การเพิ่มผลิตภาพในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตสีย้อมผ้า

นางสาวอาภาพร จันทะมาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTIVITY IMPROVEMENT IN SPRAY DRYING PROCESS IN TEXTILE DYE MANUFACTURING

Miss Apaporn Chantamat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มผลิตภาพในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตสีย้อมผ้า
โดย	นางสาวอาภาพร จันทะมาศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อาภาพร จันทะมาศ : การเพิ่มผลิตภาพในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตสีย้อมผ้า (PRODUCTIVITY IMPROVEMENT IN SPRAY DRYING PROCESS IN TEXTILE DYE MANUFACTURING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, 115 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทดีดาย ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกแนวทางการปรับปรุงของซิกซ์ ซิกมา มาใช้

ในขั้นตอนการนิยามปัญหา ผู้วิจัยเริ่มจากการระบุสภาพปัญหาในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยซึ่งพบว่า สีย้อมผ้าประเภทดีดายมีผลิตภาพต่ำที่สุดคือ 19.97 เปอร์เซ็นต์ แล้วจึงกำหนดเป้าหมายในการเพิ่มผลิตภาพขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ ในขั้นตอนการวัดผู้วิจัยได้ตรวจสอบระบบการวัดพบว่า มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดอยู่เป็นประจำจึงได้ค่าวัดที่น่าเชื่อถือ ในขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังแสดงความสัมพันธ์และแผนผังสาเหตุและผลแล้วจึงจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุโดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล ต่อมาในขั้นตอนการปรับปรุง ผู้วิจัยได้นำสาเหตุที่เลือกมาพิสูจน์นัยสำคัญและกำหนดค่าที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบการปรับตั้งค่ากระบวนการทีละปัจจัยและแบบบอกซ์-เบห์นเคน และได้ค่าของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมคือ ขนาดหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร 1 หัว ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 1712 กิโลกรัม ปริมาณน้ำล้างระบบ 324 กิโลกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อน 114 องศาเซลเซียส และในขั้นตอนการติดตามและควบคุม ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลและจัดทำแผนควบคุม ใบตรวจสอบ วิธีการปฏิบัติงาน แผนภูมิควบคุมและกราฟเพื่อควบคุมปัจจัยในกระบวนการ ค่าผลิตภาพ และตัวชี้วัดทางด้านคุณภาพให้เป็นไปตามข้อกำหนดของโรงงาน

ผลการปรับปรุงพบว่า ผลิตภาพของสีประเภทดีดายเพิ่มขึ้นจาก 19.97 เปอร์เซ็นต์เป็น 31.69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลิตภาพมีค่าเพิ่มขึ้น 58.66 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

5770366221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: PRODUCTIVITY, SPRAYDRYING PROCESS, REVERSE OSMOSIS PROCESS

APAPORN CHANTAMAT: PRODUCTIVITY IMPROVEMENT IN SPRAY DRYING PROCESS IN TEXTILE DYE MANUFACTURING. ADVISOR: ASST. PROF. NAPASSAVONG OSOTHSILP, Ph.D., 115 pp.

The objective of this thesis is to improve the production process to increase productivity of D-dye type dye. This research applied the Six Sigma improvement approach.

In the Define phase, it was found that in reverse osmosis process and spray drying process, the productivity of D-dye type was 19.97%, which was the lowest among all types. The goal of this thesis is to increase the productivity by 50%. In the Measure phase, it was found that the measuring machines are regularly calibrated. Thus, it was certain that the measuring machines give reliable measurements. In the Analyze phase, possible factors affecting productivity were listed out using by relation diagram and cause-and-effect diagram. Then, the cause-and-effect matrix was used to prioritize the causes. In the Improvement phase, one–factor–at–a–time and Box-Behnken experiments were performed to test the significance of factors and find the optimal setting. The optimal setting was using one nozzle, with the diameter of 2.5 mm., amount of membrane washing water of 1712 kg., amount of process washing water of 324 kg. and the hot air temperature of 114 C°. In the Control phase, the confirmatory run was performed. The control plan was updated. Check sheet, work instruction control chart and graphs were created to control process factors, productivity and quality indicators to be within specification limits.

After improvement, the productivity increased from 19.97% to 31.69%, equilavent to 58.66 % improvement.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Industrial Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ ที่เสียสละเวลา และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงอบรมสั่งสอนผู้วิจัยให้มีความละเอียดและรอบคอบในการทำงาน ณ โอกาสนี้ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย ประธานกรรมการสอบ รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ กรรมการสอบ และ ดร.ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการแก้ไขของวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบคุณ คุณวีณา จันทร์น้อย คุณธรรมนูญ อินทร์มะนี คุณนพดนัย ขจรไพศาล และพนักงานทุกคนของโรงงานกรณีศึกษาที่ให้สะดวกและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือและสนับสนุนให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฏ

สารบัญรูป ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ข้อมูลทั่วไปและรายละเอียดโรงงานกรณีศึกษา 1

1.3 การศึกษาสภาพของปัญหาและความสำคัญของปัญหา 3

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 9

1.5 ขอบเขตงานวิจัย 9

1.6 ผลที่ได้รับ 9

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ 10

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 10

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 12

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับผลิตภาพ 12

2.2 ทฏษฎีที่เกี่ยวข้องกับซิกซ์ ซิกมา 13

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของ ซิกซ์ ซิกมา 14

2.2.2 ความหมายของซิกซ์ ซิกมา 14

2.2.3 การปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา 15

2.3 เครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) 16
2.3.1.1 ประเภทของการออกแบบการทดลอง 17
2.3.1.2 ประเภทของแบบการทดลองแบบ DOE 17
2.3.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) 30
2.3.3 แผนภูมิควบคุม I-MR 33
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) 34
2.4.1 เมมเบรน (membrane) 35
2.4.1.1 ชนิดของเมมเบรนแบ่งตามวัสดุ 37
2.4.1.2 ชนิดของเมมเบรนแบ่งตามโมดูล (Module) 37
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนทำให้แห้งแบบพ่นฝอย (Spray Drying) 39
2.5.2 หัวฉีด (Nozzle) 41
2.5.3 ไซโคลน (Cyclone) 42
2.5.4 ฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidize Bed) 43
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรีเวิร์สออสโมซิส 45
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย 45
บทที่ 3 ขั้นตอนการนิยามปัญหา 49
3.1 ขั้นตอนการจัดตั้งทีมงาน 49
3.2 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการผลิต 50
3.2.1 กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส 50
3.2.2 กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย 52
3.3 การศึกษาสภาพของปัญหา 54
3.3.1 การคัดเลือกประเภทของสี 54
3.4 วัตถุประสงค์ของโครงการปรับปรุงคุณภาพ 55

หน้า

3.5 ขอบเขตของปัจจัย 55
3.6 กำหนดความสำคัญทางธุรกิจ (Business Case) 55
3.7 คำอธิบายสภาพปัญหา (Problem Statement) 56
3.9 ข้อจำกัดของโครงการ (Project Constraints) 56
3.10 สมมติฐานของโครงการ (Project Assumptions) 56
3.11 สรุปผลขั้นตอนการนิยามปัญหา 56
บทที่ 4 ขั้นตอนการวัดและกำหนดสาเหตุของปัญหา 59
4.1 การวิเคราะห์ความเที่ยงและความแม่นของระบบการวัด 59
4.2 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable, KPIV) 59
4.3 สรุปผลขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา 70
4.3.1 สรุปการวิเคราะห์ความเที่ยงและความแม่นของระบบการวัด 70
4.3.2 สรุปการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า 70
บทที่ 5 ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ 72
5.1 การออกแบบการทดลอง 72
5.1.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง 72
5.1.2 การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time; OFAT) 72
5.1.3 การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) 73
5.2 การคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดลอง (Sample Size Design) 74
5.2.1 การคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า 74
5.2.1 การคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน 76
5.3 การตรวจความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) 76
5.3.1 การวิเคราะห์การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า 77
5.3.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) 77

5.3.1.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) 78

5.3.1.3 การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) 78

5.3.2 การวิเคราะห์การทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน 79

5.3.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) 79

5.3.2.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) 80

5.3.2.3 การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) 81

5.4 ผลการทดลอง 82

5.4.1 ผลการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า 82

5.4.2 ผลการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน 85

5.5 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ 94

5.5.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า 94

5.5.2 สรุปขั้นตอนการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน 94

บทที่ 6 ขั้นตอนการติดตามและควบคุม 96

6.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผล 96

6.1.1 การทำการทดลองเพื่อยืนยันผล 96

6.1.2 ผลการทดลอง 97

6.1.3 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้ 99

6.2 การตรวจติดตามและควบคุม 100

6.3 สรุปขั้นตอนการติดตามและควบคุม 107

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 108

7.1 บทสรุปขั้นตอนการนิยามปัญหา 108

7.2 บทสรุปขั้นตอนการวัดและกำหนดสาเหตุของปัญหา 108

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

7.3 บทสรุปขั้นตอนการปรับปรุง 109
7.4 บทสรุปขั้นตอนการติดตามและควบคุม 110
7.5 ข้อจำกัดของงานวิจัย 110
7.6 ข้อเสนอแนะ 110
รายการอ้างอิง 111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 115

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเมทริกซ์ของการออกแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปกรณีสองปัจจัย และการทดลองสองซ้ำ 18
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการกำหนดปัจจัยแบบหน่วยค่าจริง 20
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการกำหนดปัจจัยแบบค่ารหัส 20
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างแผนการออกแบบการทดลองแบบลำดับสุ่ม 21
ตารางที่ 2.5 ค่า α ของการการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย 28
ตารางที่ 2.6 เมทริกซ์การทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบอกซ์-เบห์นเคนกรณีมี 3 ปัจจัย 29
ตารางที่ 2.7 สรุปคุณสมบัติของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบอกซ์-เบห์นเคน 30
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลผลิตภาพแต่ละสีในปี พ.ศ.2558 54
ตารางที่ 3.2 ค่าใช้จ่ายในการผลิตสีแต่ละชนิด 55
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล 65
ตารางที่ 4.2 การประเมินคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภาพสีดีดายต่ำ 65
ตารางที่ 4.3 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาของผลิตภาพสีดีดายต่ำ 67
ตารางที่ 4.4 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ 69
ตารางที่ 5.1 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการออกแบบการทดลอง 73
ตารางที่ 5.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) 74
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลผลิตภาพของสีประเภทดีดายในเดือนกันยายน พ.ศ.2559 75
ตารางที่ 5.4 ผลการหาขนาดตัวอย่างแบบความแปรปรวนแบบทางเดียว 75
ตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยขนาดหัวฉีดและผลการทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าผลิตภาพที่ขนาดหัวฉีด 4 ระดับ 83
ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ด้วยโปรแกรมมินิแทป 86
ตารางที่ 5.7 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง 87

ตารางที่ 5.8 ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง 93
ตารางที่ 6.1ระดับของปัจจัยนำเข้าก่อนการทำการปรับปรุง 97
ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบผลิตภาพก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง 98
ตารางที่ 6.3 แผนควบคุมปัจจัยนำเข้าของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฟอย 104
ตารางที่ 6.4 แผนควบคุมปัจจัยตัวแปรตอบสนองของกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฟอย 104
ตารางที่ 6.5 วิธีการปฏิบัติงานของการผลิตสีประเภทดีดายโรงงานผลิตสีสำเร็จรูป 105
ตารางที่ 6.6 ใบตรวจสอบตัวแปรด้านคุณภาพ 106

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กราฟปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าและปริมาณผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพ 4
รูปที่ 1.2 กราฟของค่าใช้จ่ายในการผลิตสี 4
รูปที่ 1.3 แผนผังกระบวนการไหลของการผลิต 6
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าของระบบการทดลอง 17
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปกรณีมีสองปัจจัย 18
รูปที่ 2.3 กราฟสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ 22
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน 23
รูปที่ 2.5 กราฟค่าส่วนตกค้างที่มีความแปรปรวนคงที่ 23
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟแสดงผลกระทบหลัก 24
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 24
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนของการออกแบบ 2^3 ปัจจัย 26
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าสูงสุด 26
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าต่ำสุด 27
รูปที่ 2.11 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางกรณี 3 ปัจจัย 27
รูปที่ 2.12 การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคนกรณี 3 ปัจจัย 28
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างหลักการของพาเรโต 80-20 31
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างของแผนภูมิพาเรโตของโดยเรียงสาเหตุจาก ก ถึง ช 32
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างแผนภูมิ I-MR 34
รูปที่ 2.16การเคลื่อนย้ายน้ำของกระบวนรีเวิร์สออสโมซิส 35
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของเยื่อเมมเบรนแบบไม่สมมาตร 35
รูปที่ 2.18 กระบวนการแยกสารละลายของรีเวิร์สออสโมซิส 36
รูปที่ 2.19 การแยกสารของเมมเบรนตามขนาดอนุภาค 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.20 โมดูลแบบแผ่นและกรอบ 38
รูปที่ 2.21 โมดูลแบบท่อ 38
รูปที่ 2.22 โมดูลแบบเส้นใยกลวงแบบป้อนสารด้านในใย 39
รูปที่ 2.23 โมดูลแบบท่อม้วน 39
รูปที่ 2.24 เครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยแบบมีฟลูอิดเบด 40
รูปที่ 2.25 ขอบเขตภายในแชมเบอร์ 41
รูปที่ 2.26 ลักษณะการพ่นของเหลวของหัวฉีด 42
รูปที่ 2.27 ไซโคลน 43
รูปที่ 2.28 ถุงกรอง 43
รูปที่ 2.29 กระบวนการฟลูอิไดเซชัน 44
รูปที่ 2.30 ผลกระทบอุณหภูมิเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยและอัตราการป้อนของแข็งในน้ำบนอัตราการระเหยเดียวกันต่อการเพิ่มผลิตภาพ 46
รูปที่ 2.31 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณของแข็งในน้ำ 47
รูปที่ 2.32 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณของแข็งในน้ำ 48
รูปที่ 3.1 แผนผังการไหลของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส 51
รูปที่ 3.2 แผนผังการไหลของกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย 53
รูปที่ 4.1 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่อาจส่งผลต่อผลิตภาพของสีดีดาย 61
รูปที่ 4.2 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย 63
รูปที่ 4.3 กราฟพาเรโตของการประเมินคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภาพสีดีดายต่ำ 66
รูปที่ 5.1 การหาขนาดตัวอย่างโดยใช้วิธีความแปรปรวนแบบทางเดียว 76
รูปที่ 5.2 การทดสอบสมมติฐานการของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า 77
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูลของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า 78

รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิตของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า 79

รูปที่ 5.5 การทดสอบสมมติฐานการของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน 80

รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูลของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน 81

รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิตของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน 82

รูปที่ 5.8 แผนภาพเปรียบเทียบผลิตภาพที่ขนาดหัวฉีด 4 ระดับ 84

รูปที่ 5.9 ผลกระทบหลักของปัจจัย A B และ C ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพ 89

รูปที่ 5.10 แผนภาพพื้นผิวที่มีต่อผลิตภาพ 89

รูปที่ 5.11 แผนภาพคอนทัวร์ที่มีต่อผลิตภาพ 90

รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย 91

รูปที่ 5.13 ผลลัพธ์การหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพ 92

รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าผลิตภาพที่สูงสุด 93

รูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบผลิตภาพก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง 99

รูปที่ 6.2 แผนภูมิควบคุมค่าผลิตภาพของสีดีดาย 101

รูปที่ 6.3 กราฟแสดงค่าความชื้นของสีหลังการปรับปรุง 101

รูปที่ 6.4 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวมของสีหลังการปรับปรุง 102

รูปที่ 6.5 กราฟแสดงค่าความเข้มสีของสีหลังการปรับปรุง 102

รูปที่ 6.6 กราฟแสดงค่าขนาดอนุภาคของสีหลังการปรับปรุง 103

Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมสีย้อมผ้าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่เป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีประสิทธิภาพในการผลิตและส่งออกนอกประเทศ อุตสาหกรรมสีย้อมผ้ามีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโดยรวมในประเทศเนื่องจากว่าเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมทำรายได้เป็นอันดับ 4 [1] นอกจากนี้ยังเป็นอุตสาหกรรมที่มีการจ้างงานสูง ปัจจุบันเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมสีย้อมผ้ามีการขยายตัวสูงขึ้นทุกปี โดยเพิ่มขึ้นปีละ 8.6 เปอร์เซ็นต์ [2] เนื่องจากผู้บริโภคมีความต้องการในเครื่องใช้สิ่งทอรวมถึงเสื้อผ้า ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและมีการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น โดยชาวต่างชาติได้เข้ามาขยายฐานการผลิตในประเทศไทยเพิ่มขึ้น ทั้งภาครัฐและภาคเอกชนจึงให้ความสำคัญกับการลงทุนอุตสาหกรรมสีย้อมผ้าในประเทศไทย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสีย้อมผ้าจะมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจในประเทศไทย แต่ยังพบอุปสรรคในการผลิตเช่น ต้นทุนวัตถุดิบที่สูงขึ้นทุกปี ค่าแรงงานสูง ผลิตภาพต่ำทำให้รอบเวลาการผลิตมีเวลายาวนานขึ้น มีการแข่งขันกันระหว่างประเทศซึ่งเป็นปัญหารุนแรงมากขึ้นทุกปีโดยเฉพาะคู่แข่งอย่างประเทศจีน ที่มีความได้เปรียบในเรื่องต้นทุนการผลิต และค่าจ้างแรงงานที่ถูกกว่าประเทศไทย ทำให้ส่งผลกระทบต่อการเติบโตทางเศรษฐกิจในอุตสาหกรรมภายในประเทศไทย

จากความต้องการของสีย้อมผ้าที่มีมากขึ้น ทางบริษัทได้มีการขยายโรงงานเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้ทันต่อความต้องการของลูกค้า แต่ถึงกระนั้นก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทางบริษัทจึงให้ความสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการผลิตสีเพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีให้มีปริมาณสีที่ผลิตได้จากกระบวนการการผลิตสีให้ได้มากที่สุด และผลที่ได้จากการเพิ่มผลิตภาพของสีตามมา คือ รอบเวลาการผลิตลดลง ทำให้สามารถผลิตสีตามความต้องการของลูกค้าได้ทัน

1.2 ข้อมูลทั่วไปและรายละเอียดโรงงานกรณีศึกษา

บริษัทเริ่มก่อตั้งตั้งแต่ปี พ.ศ.2513 ในประเทศสหรัฐอเมริกา และบริษัทมีชื่อเสียงในวงการอุตสาหกรรมและการตลาดของโลกที่ผลิตสารเคมีแตกต่างจากบริษัทอื่น ๆ โดยบริษัทกรณีศึกษาได้ดำเนินการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายในวงการอุตสาหกรรมของโลกซึ่งประกอบด้วย สารเคมี

พลาสติก ยานยนต์ การบิน สิ่งทอ รองเท้าสีและสารเคลือบ การก่อสร้าง ทางด้านเทคโนโลยีการเกษตร ทางด้านสุขภาพ การซักล้าง เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและบรรจุภัณฑ์ แต่เดิมนั้นบริษัทกรณีศึกษาเป็นที่รู้จักในวงการอุตสาหกรรมทางด้านนวัตกรรมการบรรจุภัณฑ์ ภายหลังอุตสาหกรรมทางเคมีได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วจนได้กลายเป็นบริษัทชั้นนำของโลก และได้มีการขยายสาขาไปยังประเทศต่าง ๆ รวมถึงประเทศไทย

บริษัทกรณีศึกษาในประเทศไทยได้เริ่มก่อตั้ง พ.ศ.2549 ณ จังหวัดสมุทรสาคร ซึ่งจะผลิตสีย้อมผ้าโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ผ้าคอตตอน (Cotton) และขนสัตว์ และภายในบริษัทได้มีการผลิตสีกว่า 50 สี ซึ่งสีที่ผลิตนี้จะผ่านกระบวนการที่ผลิตจากบริษัทอยู่ 3 โรงงานดังนี้

1) โรงงานสังเคราะห์พิเศษหรือเอสเอสยู (Specialty Synthesis Unit, SSU Plant) เป็นโรงงานที่สังเคราะห์หมู่เกาะผ้าจากนั้นจึงส่งไปให้โรงงานสังเคราะห์สี ซึ่งหมู่เกาะผ้าคือ สารเคมีชนิดหนึ่งที่ช่วยสีย้อมผ้าเกาะติดผ้าในขณะย้อมผ้าให้มากขึ้น ทำให้เวลาล้างน้ำสีย้อมผ้าหลุดออกจากผ้าน้อย
2) โรงงานสังเคราะห์สี (Synthesis Plant) เป็นโรงงานที่สังเคราะห์สีย้อมผ้ามีลักษณะเป็นของเหลวซึ่งจะแตกต่างกับโรงงานสังเคราะห์พิเศษ เนื่องโรงงานสังเคราะห์พิเศษ จะผลิตหมู่เกาะผ้า แต่โรงงานสังเคราะห์สีจะนำหมู่เกาะผ้าจากโรงงานสังเคราะห์พิเศษ มาผสมในสีสังเคราะห์ในกระบวนการผลิตสีย้อมผ้าซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลว และจากที่เสร็จสิ้นกระบวนการสังเคราะห์สีย้อมผ้าแล้วจึงส่งต่อไปยังโรงงานสีสำเร็จรูป (Finishing Plant) เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงต่อไป
3) โรงงานสีสำเร็จรูป (Finishing Plant) เป็นโรงงานที่รับสีจากโรงงานสังเคราะห์สีย้อมผ้าเพื่อทำให้สีที่มีลักษณะเป็นของเหลวเป็นผงสี เพื่อพร้อมสำหรับการส่งมอบให้แก่ลูกค้า

บริษัทที่ใช้เป็นกรณีศึกษาเป็นโรงงานสีสำเร็จรูปซึ่งมีการผลิตสีมากกว่า 50 สี และสามารถแบ่งประเภทของสีได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ เอดาย (A-Dye) แอลดาย (L-Dye) เอฟดาย (F-Dye) นอนเอฟดาย (non F-dye) และดีดาย (D-Dye) จึงเป็นที่มาของการศึกษาสภาพปัญหาเพื่อบ่งชี้ปัญหาของประเภทของสีที่มีปัญหามากที่สุดเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสีให้มีผลิตภาพมากยิ่งขึ้น

1.3 การศึกษาสภาพของปัญหาและความสำคัญของปัญหา

จากการศึกษาสภาพปัญหาของกระบวนการผลิตของประเภทสีทุกประเภทตั้งแต่ปี พ.ศ.2557 จนถึงปี พ.ศ.2558 สามารถคำนวณผลิตภาพ (Productivity) ของสีได้ดังนี้

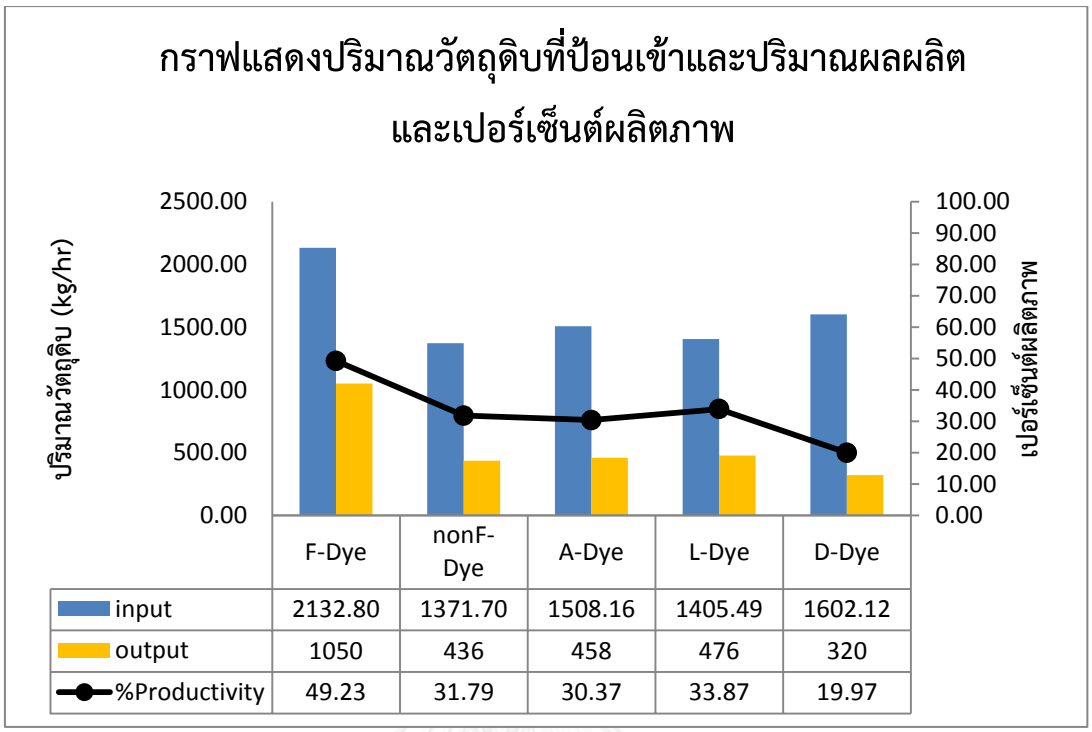
$$\text{Productivity} = \frac{\text{output}}{\text{input}}$$

เมื่อ Input = ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ไป (kg/hr)

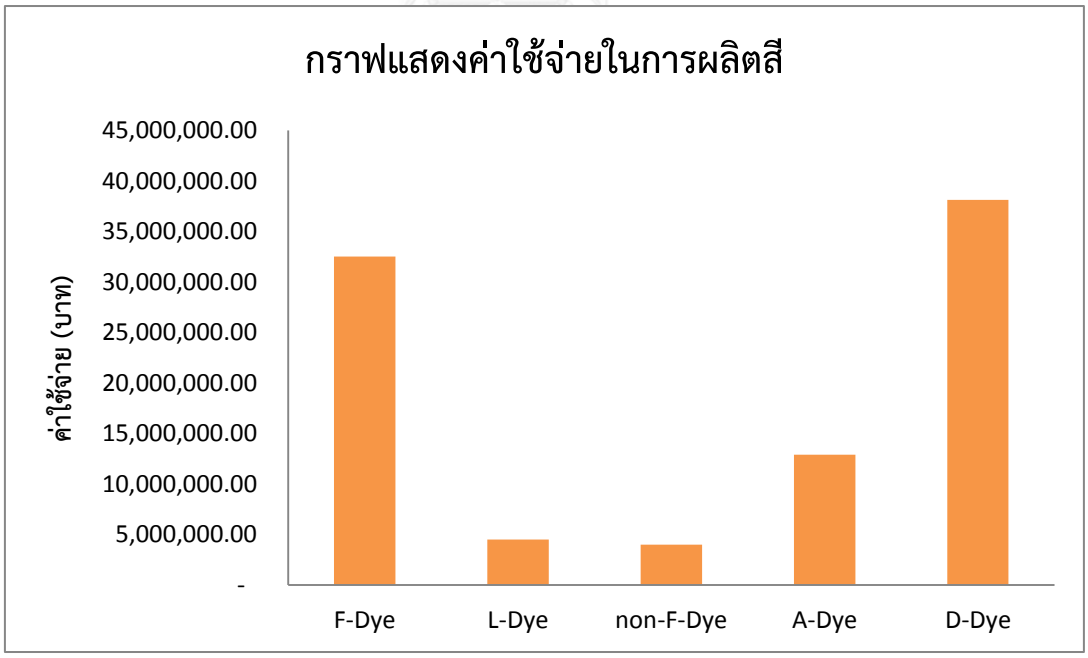
Output = ปริมาณผลผลิต (kg/hr)

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลภายของโรงงานสีสำเร็จรูปซึ่งมีสีทั้งหมด 5 ประเภท ซึ่งได้แก่ เอดาย แอลดาย เอฟดาย นอนเอฟดายและดีดาย ซึ่งแบ่งตามลักษณะหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสี แล้วจึงได้เริ่มทำการศึกษาข้อมูลและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวข้องตั้งแต่ปี พ.ศ.2557 ถึง พ.ศ.2558 เพื่อคัดเลือกประเภทของสีและระบุสภาพปัญหาของงานวิจัยสามารถดูได้จากรูปที่ 1.1 พบว่า ผลิตภาพของสีประเภทดีดายมีค่าผลิตภาพต่ำที่สุดซึ่งเท่ากับ 19.97 เปอรเซ็นต์ ทำให้บริษัทใช้เวลาในการผลิตสีมาก ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงเนื่องจากว่าต้นทุนการผลิตสีทุกประเภทแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการผลิต ในปัจจุบันมีต้นทุนการผลิตเป็นเงิน 38,145,354 บาทต่อปี ดังรูปที่ 1.2 นอกจากนั้นเวลาในการผลิตสีดีดายมีระยะเวลาการผลิตสีที่ยาวนานทำให้ไม่สามารถผลิตสีให้ทันต่อความต้องการลูกค้า ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสีเพิ่มมากขึ้นและยังทำให้ตารางการผลิตสีประเภทอื่น ๆ คลาดเคลื่อนออกไปอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1.1 กราฟปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าและปริมาณผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพ

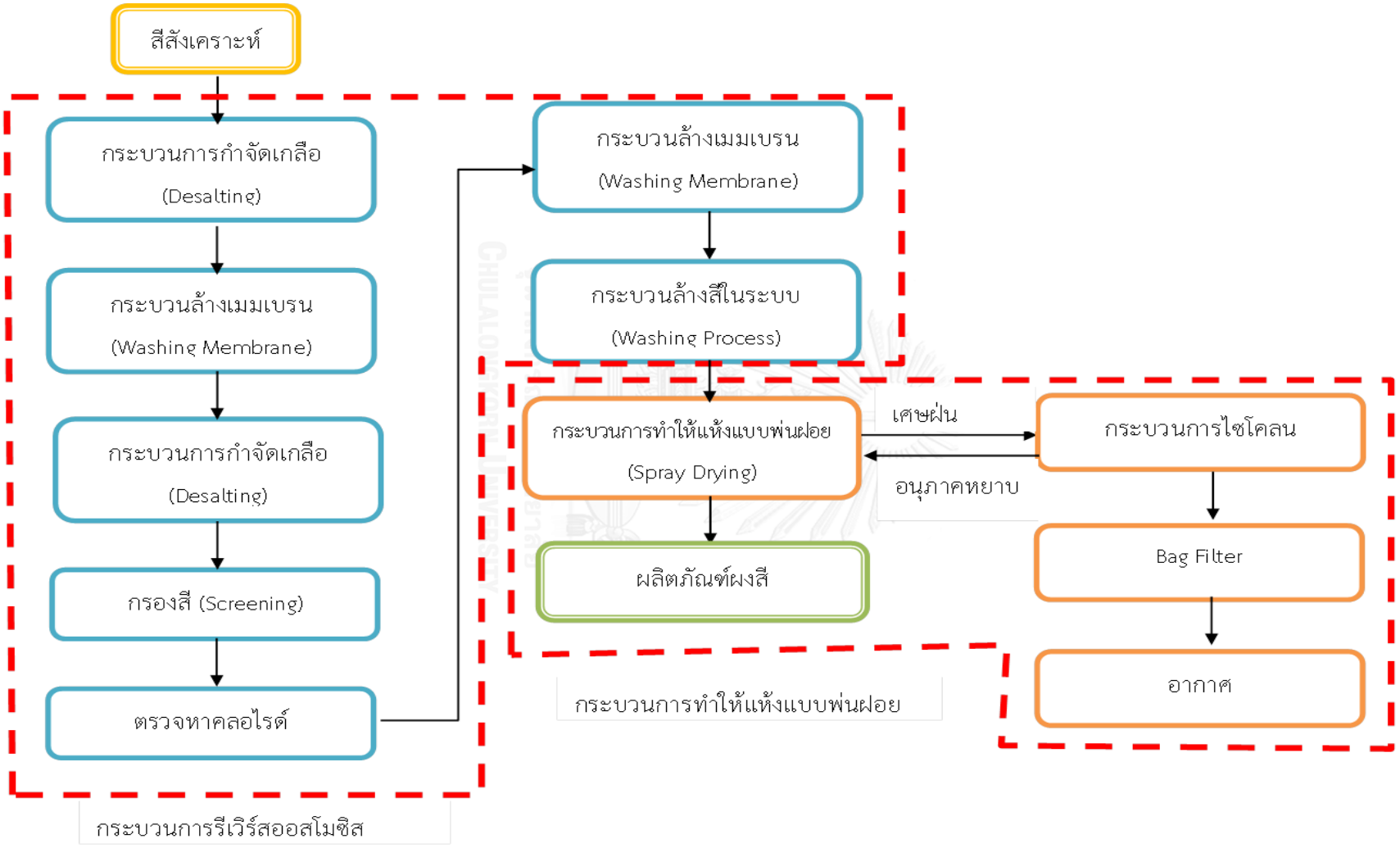


รูปที่ 1.2 กราฟของค่าใช้จ่ายในการผลิตสี

สรุปได้ว่าผู้วิจัยจึงได้เลือกการปรับปรุงกระบวนการผลิตของสีดีดาย เนื่องจากว่าหากสามารถเพิ่มผลิตภาพของสีที่เป็นปัญหาจากที่กล่าวข้างต้นแล้วยังสามารถลดรอบเวลาในการผลิตสีได้ ทำให้ผู้วิจัยเลือกสีประเภทดีดายเพื่อทำการศึกษาสภาพปัญหาและสาเหตุต่อไปภายในอนาคตทางโรงงานคาดว่าความต้องการของสีประเภทดีดายจะมากขึ้นทุก ๆ ปี ดังนั้น จึงต้องเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทดีดายเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการลูกค้าที่เกิดขึ้นภายในอนาคต

สีประเภทดีดายมีทั้งหมด 6 เฉดสี ได้แก่ สีเหลือง สีส้ม สีแดง สีแดงเลือดหมู สีน้ำเงิน และสีน้ำเงินเข้ม หลังจากได้คัดเลือกประเภทสีที่ทำการวิจัยแล้วจึงได้ทำการศึกษาสีของสีประเภทดีดายแต่เนื่องจากว่าการตั้งค่าเครื่องจักรในการผลิตสีประเภทดีดายมีการตั้งค่าที่ใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถที่ทำการศึกษาสาเหตุและสภาพปัญหาไปพร้อม ๆ กันได้ ซึ่งมีกระบวนการผลิตหลัก 2 กระบวนการคือ กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย ดังรูปที่ 1.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1.3 แผนผังกระบวนการไหลของการผลิต

1. กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายไหลผ่านเมมเบรน (Membrane) ซึ่งเป็นเยื่อเลือกผ่านทำหน้าที่แยกตัวทำละลายออกจากเนื้อสี จากด้านที่มีความเข้มข้นของสารมากไปยังด้านที่มีความเข้มข้นของสารน้อย ทำให้สีมีความเข้มข้นมากเรียกว่า คอนเซนเทรทหรือรีเทนเทท (Concentrate, Retentate) และมีปริมาณเนื้อสีในน้ำ (Solid Content) มากขึ้นและไหลอยู่ภายในเมมเบรน ส่วนสารที่มีความเข้มข้นน้อยจะถูกแรงดันอัดออสโมติก (Osmotic) ให้ไหลผ่านเมมเบรนออกไปเรียกว่า เพอมิเอต (Permeate) ซึ่งในกระบวนการรีเวิร์สออกโมซิสของสีมีขั้นตอนย่อยดังรูปที่ 1.3 ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนย่อยของระบบได้ดังนี้

1.1 กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalting) เป็นขั้นตอนที่ดึงเกลือจำพวกคลอไรด์ออกจากสี โดยเติมน้ำอ่อน (Soft Water) และเดินเครื่องจักรทำให้เมมเบรนทำการแยกเกลือและน้ำออกจากสีทำให้น้ำหนักของสีลดลงจนได้น้ำหนักค่าหนึ่งหรือปริมาณคอนเซนเทรทปริมาณค่าหนึ่ง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการกำจัดเกลือ 2 ครั้ง และหลังจากที่ทำการกำจัดเกลือเสร็จแล้วจึงเคลื่อนย้ายสีที่ผ่านการกำจัดเกลือไปไว้ในถังพักสี

1.2 กระบวนล้างเมมเบรน (Washing Membrane) เป็นการใช้น้ำไล่สีที่อยู่ในเมมเบรนออกไปเพื่อลดการอุดตันสีในเมมเบรนสำหรับการกำจัดเกลือในครั้งต่อไป น้ำที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้จะถูกส่งไปรวมกับถังพักสีของข้อ 1.1

1.3 กระบวนการกำจัดเกลือ 2 (Desalting) ขั้นตอนนี้จะนำสีจากข้อ 1.2 มาใช้ในกระบวนการกำจัดเกลือโดยมีขั้นตอนเหมือนกับข้อ 1.1 แต่ใช้น้ำดีมิน (Demin Water) ในการกำจัดเกลือและหลังจากที่กำจัดเกลือเสร็จจะเติมลิเทียมคลอไรด์ (Lithium Chloride, LiCl) และทำการกำจัดเกลือต่อไป

1.4 กระบวนการกรอง (Screening) หลังจากเสร็จจากกระบวนการกำจัดเกลือแล้วต้องมากรองสิ่งสกปรกออกจากสีเพื่อไม่ให้มีสิ่งสกปรกปนเปื้อนสี

1.5 การตรวจหาคลอไรด์ ขั้นตอนนี้ทำหลังจากการกรองสิ่งสกปรกตามข้อ 1.4 เพื่อตรวจหาคลอไรด์หรือเกลือที่อยู่ในสี แล้วเคลื่อนย้ายไปในถังพักสีรอการสเปรย์สี

1.6 กระบวนล้างเมมเบรน 2 (Washing Membrane) หลังจากที่ตรวจหาความเข้มข้นของคลอไรด์แล้วต้องใช้น้ำไล่สีที่อยู่ในเมมเบรนออกเพื่อไล่สีที่ค้างอยู่ออกจากเมมเบรนและน้ำที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้จะถูกส่งไปรวมกับถังพักสีรอสเปรย์ตามข้อ 1.5

1.7 กระบวนล้างสีในระบบ (Washing Process) จากการกำจัดเกลือตามข้อ 1.1 และ 1.3 ทำให้มีสีหลงเหลืออยู่ภายในถังพักสีและภายในระบบจึงต้องใช้น้ำล้างสีในถังและล้างระบบเพื่อนำสีที่หลงเหลืออยู่ไปรวมกับสีที่อยู่ในถังรอสเปรย์

2. กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย (Spray Drying) เป็นกระบวนการนี้เกิดขึ้นภายในแชมเบอร์ (Chamber) โดยทำให้ของเหลวแห้งโดยการพ่นของเหลวให้เกิดเป็นละอองเล็ก ๆ สัมผัสกับอากาศที่ร้อนจนของเหลวระเหยจนหมดกลายเป็นผลิตภัณฑ์ในลักษณะของผงแห้ง ซึ่งในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยมีขั้นตอนย่อยดังรูปที่ 1.3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย เป็นขั้นตอนที่ป้อนของเหลวเข้าสู่หัวฉีดโดยอาศัยแรงดันแล้วพ่นของเหลวออกมาในลักษณะของละอองเล็ก ๆ และสัมผัสกับอากาศร้อนจากท่อนำเข้าที่ต่อกับแก๊สหุงต้ม (LPG) ภายในแชมเบอร์ทำให้ของเหลวระเหยออกไปจนเหลือเพียงแค่สีในลักษณะที่เป็นผงและตกไปยังข้างล่างแชมเบอร์จะถูกลมจากข้างล่างแชมเบอร์เป่าที่เรียกว่า อากาศร้อน (Hot Air) เป่าสีที่เป็นผงให้แห้งขึ้นและสีที่ก็จะตกลงไปยังส่วนบรรจุภัณฑ์ ส่วนอากาศร้อนที่อยู่ในแชมเบอร์จะถูกนำออกโดยท่อนำออกและพัดพาเศษฝุ่นละอองที่อยู่ในแชมเบอร์ออกไปยังไซโคลน (Cyclone) เพื่อดำเนินการกรองเศษฝุ่นละอองต่อไปซึ่งจะอธิบายในข้อ 2.2

2.2 กระบวนการไซโคลน (Cyclone) หลังจากที่อากาศร้อนที่อยู่ในแชมเบอร์พัดพาเศษฝุ่นละอองและไหลออกไปยังท่อนำออกและเข้าสู่ไซโคลนจะทำให้เกิดลมพายุหมุนภายในไซโคลน เศษฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคหยาบ (Crude Particle) จะถูกพัดไปตามแรงพายุหมุนจนถึงข้างล่างไซโคลนและกลับเข้าสู่แชมเบอร์เพื่อไปรวมกับผงสีภายในแชมเบอร์ ส่วนเศษฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคละเอียด (Fine Particle) จะหลุดออกจากแรงลมพายุหมุนและถูกพัดออกไปยังถุงกรอง (Bag filter) เพื่อกรองอากาศก่อนออกไปสู่สภาพแวดล้อม

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือของซิกซ์ ซิกมา ในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีย้อมผ้าประเภทดีดายให้มากขึ้นโดยใช้แนวทางในการปรับปรุงคือ วัตถุดิบป้อนเข้าเท่าเดิมแต่เพิ่มผลผลิตให้มากขึ้น ซึ่งเริ่มจากการนิยามปัญหา (Define Phase) เป็นขั้นตอนเริ่มต้นที่กำหนดหัวข้อและขอบเขตของโครงการว่าโครงการนี้มีความเหมาะสมที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโดยเกิดผลประโยชน์ต่อทางบริษัทหรือองค์กร ต่อมาจะมาทำขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure Phase) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนทำแผนการเก็บรวบรวมข้อมูลและกำหนดวิธีการเก็บข้อมูลให้เหมาะสมกับโครงการเพื่ออธิบายถึงสภาพของโครงการที่ปรับปรุงโดยการวิเคราะห์

ความสามารถของกระบวนการและก่อนที่จะเก็บข้อมูลต้องมีการวิเคราะห์ความสามารถระบบการวัด ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา (Analyze Phase) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ทีมร่วมมือกันวิเคราะห์สาเหตุรากเหง้าของปัญหาที่มีนัยสำคัญต่อปัญหา แล้วนำข้อมูลมาเรียงลำดับและทำตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เพื่อให้ทุกคนแสดงความคิดเห็นและลงคะแนนตามเกณฑ์ที่ในทีมได้ตกลงไว้ และนำคะแนนที่ได้มาเรียงความสำคัญจากมากไปน้อยและตัดปัจจัยที่คาดว่าจะไม่มีผลกระทบหรือมีผลกระทบน้อยออกไป และนำปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลมากมาทำการทดลองเพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing) ว่าปัจจัยที่ทดลองนั้นมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อตัวแปรตอบสนองโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) และขั้นตอนสุดท้ายขั้นตอนการติดตามผลและควบคุมผล (Control Phase) เป็นขั้นตอนที่นำค่าปัจจัยที่เหมาะสมมาทดลองใช้ในสายการผลิตจริง และสร้างแผนภูมิควบคุมและวิธีควบคุมกระบวนการเพื่อรักษาผลปฏิบัติงานหลังปรับปรุง

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องมีการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องมีการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาค่าที่เหมาะสม เครื่องมือของซิกซ์ ซิกมาจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทสีดีดาย

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทสีดีดายเท่านั้น
2. ศึกษากระบวนการผลิตของสีได้แก่ กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเท่านั้น ซึ่งไม่รวมขั้นตอนการปรับปรุงขั้นตอนการสังเคราะห์สีและขั้นตอนการบรรจุภัณฑ์
3. ศึกษาขนาดอนุภาคของสี 50 – 100 ไมครอน เท่านั้น

1.6 ผลที่ได้รับ

1. แนวทางการปรับปรุงกระบวนผลิตในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส และกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย

2. ผลิตภาพเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถเพิ่มผลิตภาพของสีและลดรอบเวลาการผลิตสีประเภทสีดีดาย
2. สามารถเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของสีประเภทอื่น ๆ ได้
3. ได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือและขั้นตอนการดำเนินงานแบบซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ในการปรับปรุงคุณภาพและเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอื่น ๆ ต่อไป

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทสีดีดาย มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ขั้นตอนการนิยามปัญหา (Define Phase)
   ก. ศึกษากระบวนการผลิตสีดีดายเพื่อรวบรวมข้อมูลในการอธิบายสภาพปัญหา
   ข. รวบรวมและเก็บข้อมูลของผลิตภาพของสีทุกประเภทเพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจเลือกหัวข้อของปัญหาและปรับปรุงแก้ไข
   ค. จัดทำแผนร่างโครงการ (Project Charter) เพื่อเสนอต่อผู้บริหาร
   ง. จัดทำแผนผังการไหลของกระบวนการ (Flow Process Map) เพื่อระบุขั้นตอนในการปรับปรุงแก้ไข
   จ. วางแผนกำหนดการในการดำเนินงานวิจัย
3. ขั้นตอนการวัดเพื่ออธิบายสภาพปัญหา (Measure Phase)
   ก. ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของระบบการวัด
   ข. เก็บและรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตสีประเภทสีดีดาย
4. ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา (Analyze Phase)
   ก. ระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าโดยใช้แผนผังแสดงความสัมพันธ์ (Relation Diagram)แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)
   ข. กำหนดปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะมีผลโดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) และให้คะแนนตามความสำคัญของปัจจัยแล้วจึง

นำมาจัดเรียงคะแนนของปัจจัยเพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่ามีผลกระทบสูงต่อปัญหาไปทำการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

5. ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase)
   ก. นำปัจจัยที่มีนัยสำคัญกับการออกแบบการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface) เพื่อหาค่าของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมต่อตัวแปรตอบสนอง
   ข. นำค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองมาวางแผนการทดลองใช้งานกับเครื่องจักรจริงและเก็บข้อมูลการทดลองตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้
   ค. วิเคราะห์ผลและสรุปผลที่ได้จากการทดลองค่าของปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงและควบคุมผลในขั้นตอนต่อไป
6. ขั้นตอนการติดตามผลและควบคุมผล (Control Phase)
   ก. ทดสอบผลและเก็บข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ
   ข. ใช้เครื่องมือคุณภาพมาใช้ในการติดตามผล
   ค. สรุปผลและวิจารณ์ผลในการปรับปรุงกระบวนการและเปรียบเทียบกับกระบวนการก่อนหน้าการปรับปรุงกระบวนการ
   ง. จัดทำคู่มือแนวทางการผลิตใหม่และอบรมพนักงานให้มีความเข้าใจกับการปรับตั้งค่าเครื่องจักรแบบใหม่
7. สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับผลิตภาพ

การจัดการทางการผลิต นำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการผลิต ต้องมีหน่วยวัดผลการปฏิบัติงาน โดยมองถึงผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ในการก่อให้เกิดผลผลิตนั้น ซึ่งเรียกว่า “ผลิตภาพ” [3]

การวัดความสามารถในการผลิตจะใช้หน่วยวัดที่เรียกว่า ประสิทธิภาพ (Efficiency) ประสิทธิผล (Effectiveness) และผลิตภาพ (Productivity)

- ประสิทธิภาพเป็นคำที่คุ้นเคยอย่างมากสำหรับงานวิศวกรรม เพราะงานออกแบบทางวิศวกรรมจะต้องใช้เกณฑ์ประสิทธิภาพเป็นหัวใจในการออกแบบ โดยให้ความสูญเสียของทรัพยากรที่เข้าไปในระบบมีความสูญเสียน้อยที่สุด

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$$

โดยความหมายของ Output จะอยู่ในรูปของพลังงานหรืองานที่ได้ ส่วน Input จะอยู่ในรูปของพลังงานหรืองานที่ป้อนเข้าไปด้วยเช่นกัน การออกแบบทางวิศวกรรมที่ดีจึงเป็นการออกแบบที่ Input ต้องใกล้เคียงกับ Output ให้มากที่สุด คือ ให้ความสูญเสียในระบบน้อยที่สุด ค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพก็มีค่าต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์เสมอ

- ประสิทธิผล หมายถึง เปอร์เซ็นต์การบรรลุเป้าหมายโดยเทียบกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ ดังนั้นประสิทธิภาพและประสิทธิผลไม่จำเป็นต้องเป็นไปในแนวทางเดียวกัน เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสินค้าถึงผู้บริโภคโดยมีวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่นำส่งให้ไม่ทันอาจจะสู้การนำส่งโดยวิธีที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าค่าใช้จ่ายสูงกว่าแต่มีประสิทธิผลแน่นอนกว่า

- ผลิตภาพ คือ ดัชนีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตซึ่งมีสูตรเทอมเดียวกันกับประสิทธิภาพ

ความหมายของผลิตภาพมีความสัมพันธ์กับผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ ในการเปรียบเทียบความหมายของประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และผลิตภาพ กล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพแสดงถึงการใช้ทรัพยากรว่าดีระดับใดเพื่อให้ผลผลิตที่ต้องการ ขณะที่ประสิทธิผลแสดงถึงการบรรลุตามวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายที่พึงปรารถนาหรือเป็นไปตามที่คาดหวังไว้ ความหมายผลิตภาพนั้นจึงเป็นความหมายร่วมของประสิทธิภาพและประสิทธิผลเนื่องจากประสิทธิภาพมีความสัมพันธ์กับการใช้ทรัพยากร ขณะที่ประสิทธิผลมีความสัมพันธ์กับผลงานที่ต้องการ แต่ผลิตภาพต้องใช้ความสัมพันธ์ของทั้งผลผลิตและทรัพยากร ผลิตภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) ผลิตภาพเฉพาะส่วน (Partial Productivity) คือ อัตราส่วนของผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละชนิด เช่น ผลิตภาพแรงงาน ผลิตภาพวัตถุดิบ เป็นต้น
2) ผลิตภาพองค์ประกอบรวม (Total Factor Productivity) คือ อัตราส่วนผลผลิตสุทธิต่อผลรวมของทรัพยากรด้านเงินลงทุนและแรงงาน
3) ผลิตภาพรวม (Total Productivity) คือ อัตราส่วนของผลผลิตทรัพยากรที่ใช้ทั้งสิ้น

การเพิ่มผลิตภาพมีอยู่ 5 ทาง ดังนี้

1. ผลผลิตเพิ่ม ใช้ทรัพยากรเท่าเดิม
2. ผลผลิตเพิ่มขึ้น ใช้ทรัพยากรลดลง
3. ผลผลิตเพิ่มขึ้น ใช้ทรัพยากรเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่า
4. ผลผลิตคงที่ ใช้ทรัพยากรลดลง
5. ผลผลิตเพิ่มขึ้น ใช้ทรัพยากรลดลงในอัตราที่สูงกว่า

สรุปได้ว่างานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับผลิตภาพเฉพาะส่วนนั่นคือ ผลิตภาพวัตถุดิบ โดยสามารถแสดงสูตรในการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ผลิตภาพวัตถุดิบ} = \frac{\text{ผลผลิต}}{\text{ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้}}$$

ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้แนวทางผลผลิตเพิ่มแต่ใช้ทรัพยากรเท่าเดิมนั่นคือทำให้ใช้วัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตสีเท่าเดิมแต่สามารถทำให้เกิดผลผลิตสีได้มากขึ้น แต่วิธีในการดำเนินงานวิจัยสามารถศึกษาได้ในรายละเอียดของบทถัดไป

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับซิกซ์ ซิกมา

ซิกซ์ ซิกมา ถือได้ว่าเป็นแนวทางในการปฏิบัติในปัจจุบันที่คนส่วนใหญ่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมาในการแก้ไขปัญหาและนำเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับซิกซ์ ซิกมามาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพได้อย่างเป็นลำดับขั้นตอนและเป็นแบบแผนในการปฏิบัติงานในครั้งถัดไป นอกจากนี้ยังสามารถนำแนวทางของซิกซ์ ซิกมา ไปปรับปรุงปัญหาอื่น ๆ นอกเหนือจากงานวิจัยนี้ต่อไป สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของ ซิกซ์ ซิกมา

แนวทางปฏิบัติของซิกซ์ ซิกมา เป็นเทคนิคการในการปรับปรุงคุณภาพที่ช่วยในการบริหารงานคุณภาพเพื่อมุ่งสู่คุณภาพระดับโลกหรือระดับซิกซ์ ซิกมา โดยจุดเริ่มต้นของซิกซ์ ซิกมา เกิดจากจากบริษัท โมโตโรลา (Motorola) ในช่วงปี ค.ศ. 1980 โดยมิสเตอร์อาร์ท ซันดราย (Mr. Art Sundry) ประธานบริษัท โมโตโรลา ซึ่งมีนโยบายมุ่งเน้นในการลดต้นทุนและปรับกระบวนการทำงานให้มีคุณภาพให้มีความสอดคล้องกับนโยบายที่บริษัทตั้งไว้ จากนั้นในปี ค.ศ.1981 บริษัท โมโตโรลา ได้จัดทำโครงการซิกซ์ ซิกม่า จำนวนถึง 10 โครงการและใช้ระยะเวลา 5 ปี ในการปรับปรุงโครงการ และในปี ค.ศ.1989 ทางบริษัท โมโตโรลา ได้รับรางวัล Malcolm Baldrige National Quality Award และทำให้บริษัทได้ก่อตั้งสถาบันซิกซ์ ซิกมา ในปัจจุบันนี้ซิกซ์ ซิกมา ได้เข้ามามีบทบาทกับบริษัทชั้นนำหลายบริษัททั่วโลก ซึ่งบริษัทต่าง ๆ ได้เล็งเห็นประโยชน์ของซิกซ์ ซิกมา และได้นำมาประยุกต์ใช้ภายในบริษัทให้มีคุณภาพระดับโลกที่ทุกคนต่างยอมรับผลจากการประยุกต์ใช้

2.2.2 ความหมายของซิกซ์ ซิกมา

ซิกซ์ ซิกมา หมายถึง กระบวนการที่ลดความผิดพลาด (Defect) ในกระบวนการต่าง ๆ โดยมีเป้าหมายให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด และมีความสูญเสียได้ไม่เกิน 3.4 หน่วยในล้านหน่วย ส่วนสัญลักษณ์ที่ใช้ในทางสถิติ คือ ซิกมา (σ) และยังเป็นตัวกำหนดขอบเขตข้อกำหนดบนในระดับ 6 ซิกมา (6σ) และขอบเขตข้อกำหนดล่างในระดับ 6 ซิกมา (6σ) ในการแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

Mikel J. Harry [4] ได้กล่าวไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมา หมายถึง กลยุทธ์ที่บริษัทใช้เครื่องมือทางสถิติมาใช้ในการพัฒนาและเพิ่มคุณภาพของสินค้าและการบริการ นอกจากนี้ยังได้ใช้สัญลักษณ์ทางสถิติ คือ ซิกมา (σ) เป็นตัววัดความผันแปรของกระบวนการ และยังแสดงถึงระดับการเบี่ยงเบนของกระบวนจากเป้าหมายที่ตั้งไว้ให้ได้คุณภาพซึ่งอยู่ที่ค่า 4 ซิกมา (4σ) ถ้าอยากให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุดต้องใช้ค่าระดับ 6 ซิกมา (6σ) ที่ทั่วโลกต่างยอมรับกัน

สมยศ วงษ์น้อย [5] ได้กล่าวไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมา คือ แนวทางในการพัฒนาองค์กรให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งหลายองค์กรได้พิสูจน์แล้วว่าสามารถเพิ่มการพัฒนาให้องค์กรมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามเป้าหมายขององค์กร ซึ่งเป้าหมายขององค์กร คือ สามารถมีโอกาสในการเกิดความผิดพลาดได้ 3.4 ความผิดพลาดต่อ 1 ล้านครั้งในการทำงาน ทั้งนี้องค์กรจะใช้วิธีทางสถิติในการประยุกต์ใช้กับการพัฒนาองค์กรให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและเป็นที่ยอมรับ และถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมใหม่ในการบริหารการจัดการในองค์กรได้อย่างดีเยี่ยม

พโยม เหลือแก้ว [6] ได้กล่าวว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นกลยุทธ์ที่ใช้บริหารงานในองค์กรหรือบริษัท

ที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิผลให้ตอบสนองความพึงพอใจและความต้องการของลูกค้าในสินค้าหรือการบริการให้ดีที่สุดโดยใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่ามากที่สุดเพื่อให้ได้ผลกำไรในระยะยาว

สรุปได้ว่า ซิกซ์ ซิกมา คือ กลยุทธ์หรือเครื่องมือทางสถิติที่นำมาใช้ในพัฒนาการบริหารการจัดการในองค์กรหรือบริษัทให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพมากที่สุดในแง่ของสินค้าและการบริการ โดยทำการให้องค์กรหรือบริษัทมีคุณภาพนั้นจะต้องควบคุมหรือลดความแปรปรวนของกระบวนการให้อยู่ภายใต้ 4 ซิกมา หรือถ้าหากต้องการให้องค์กรหรือบริษัทมีคุณภาพสูงสุดต้องควบคุมหรือลดความแปรปรวนให้อยู่ภายใต้ 6 ซิกมา จึงถือได้ว่าเป็นการบริหารการจัดการที่ดีเยี่ยม

2.2.3 การปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา

ในการปรับปรุงคุณภาพให้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายนั้นจะต้องมีการดำเนินการตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา ซึ่งที่เรียกว่า “DMAIC” [7] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

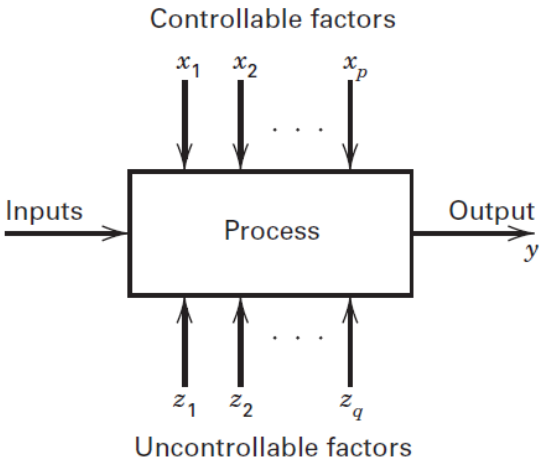
1. ขั้นตอนการนิยามปัญหา (Define Phase) เป็นขั้นตอนที่เริ่มต้นกำหนดหัวข้อและขอบเขตของโครงการว่าโครงการนี้มีความเหมาะสมที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลง โดยต้องคำนึงถึงความพึงพอใจของลูกค้าและผลประโยชน์ต่อทางบริษัทหรือองค์กรที่ได้รับถ้าโครงการมีความเหมาะสมในการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงแล้วให้ทำการค้นหาลูกทีมเพื่อช่วยในการปรับปรุงโครงการ หลังจากนั้นทำการเขียนรายละเอียดโครงการ (Project Charter) ซึ่งรายละเอียดโครงการจะประกอบด้วย วัตถุประสงค์ ขอบข่าย ตัวชี้วัดทางธุรกิจ เป้าหมายของโครงการ รายชื่อสมาชิก และระยะเวลาในการดำเนินงาน แล้วนำเสนอต่อผู้บริหารเพื่อให้อนุมัติโครงการ หลังจากเสร็จสิ้นการอนุมัติโครงการจึงเริ่มจัดทำแผนภาพกระบวนการผลิต (Process Map) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการผลิตว่าโครงการที่ทำการปรับปรุงจะปรับปรุงในขั้นตอนใด
2. ขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure Phase) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนทำแผนการเก็บรวบรวมข้อมูลและกำหนดวิธีการเก็บข้อมูลให้เหมาะสมกับโครงการเพื่ออธิบายถึงสภาพของโครงการที่ปรับปรุงโดยการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis, PCA) แล้วจึงประเมินความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงมีความแตกต่างจากเป้าหมายอย่างไร และก่อนที่จะเก็บข้อมูลต้องมีการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดเสียก่อนเพื่อสร้างความมั่นใจว่าระบบมีการวัดมีความน่าเชื่อถือ (Reliability)

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา (Analyze Phase) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ทีมร่วมมือกันวิเคราะห์สาเหตุรากเหง้าของปัญหาที่มีนัยสำคัญต่อปัญหา สาเหตุของปัญหานั้นอาจมีความเป็นไปได้หลายสาเหตุ จึงต้องทำการคัดกรองปัญหาเพื่อพิสูจน์ว่าสาเหตุของปัญหามีนัยสำคัญด้วยเครื่องมือต่าง ๆ เช่น ก้างปลา (Fish Bone) แผนผังแสดงความสัมพันธ์ (Relation Diagram) เป็นต้น หลังจากที่คัดกรองปัญหาแล้วนำข้อมูลมาเรียงลำดับและทำตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เพื่อให้ทุกคนแสดงความคิดเห็นและลงคะแนนตามเกณฑ์ที่ในทีมได้ตกลงไว้ และนำคะแนนที่ได้มาเรียงความสำคัญจากมากไปน้อยและตัดปัจจัยที่คาดว่าจะไม่มีผลกระทบหรือมีผลกระทบน้อยออกไป และนำปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการทดลองมาทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing) เพื่อระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง และทำการออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับจำนวนปัจจัยที่มาทดลอง
4. ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อตัวแปรตอบสนองโดยโดยใช้เทคนนิคการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) จึงนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติเพื่อหาระดับปัจจัยที่ได้ที่สุดต่อตัวแปรตอบสนอง
5. ขั้นตอนการติดตามผลและควบคุมผล (Control Phase) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่นำค่าปัจจัยที่เหมาะสมมาทดลองใช้กับเครื่องจักรและใช้ 7 เครื่องมือคุณภาพ (7 QC Tools) ในการติดตามและควบคุมผลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติของกระบวนการ และหลังจากที่ติดตามผลแล้วพบว่ากระบวนการใหม่ที่ออกแบบนิ่งแล้วให้จัดทำคู่มือมาตรฐานและอบรมพนักงานให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการตั้งค่าเครื่องจากใหม่

2.3 เครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นการวางแผนการทดลองเพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและหาค่าปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมต่อตัวแปรตอบสนอง โดยปัจจัยนำเข้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) และปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) [8, 9] ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าของระบบการทดลอง

2.3.1.1 ประเภทของการออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบการทดลองแบบการตั้งค่ากระบวนการทีละปัจจัย (One-Factor-at-a-Time, OFAT) วิธีนี้เป็นการทดสอบทีละปัจจัยโดยการทดลองแต่ละครั้งมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่สนใจแค่ปัจจัยเดียวและคงที่ค่าปัจจัยตัวอื่น ๆ ไว้ ในการสรุปผลการทดลองจึงสามารถสรุปผลได้เพียงแค่ปัจจัยเดียวเนื่องจากว่ามีการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว ปัจจัยตัวอื่น ๆ คงที่ไว้

2. การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE) วิธีนี้เป็นการทดลองปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัย และที่ระดับปัจจัยอย่างน้อยสองระดับ ซึ่งทำให้สามารถทดลองผลกระทบระหว่างปัจจัยได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.1.2 ประเภทของแบบการทดลองแบบ DOE

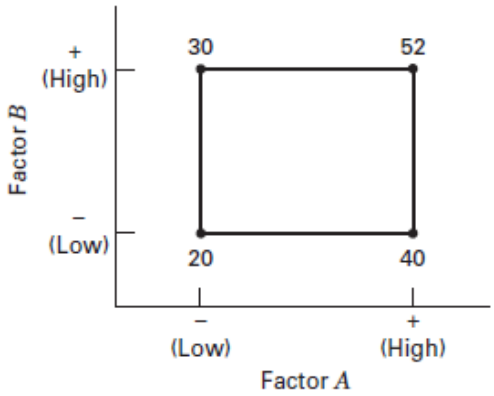
1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นการทดลองที่เกิดจากการนำปัจจัยทั้งหมดที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองมาทำการทดลอง ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลและสรุปผลของปัจจัยในสภาวะการทดลองต่าง ๆ ได้

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design)

- การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปกรณีปัจจัยที่สองระดับ คือ แบบการทดลองที่ประกอบไปด้วยทุกคอมบิเนชัน (Combination) ของระดับของปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยจะถูก

ทดลองที่สองระดับ ที่ค่าที่ระดับสูง (+1 หรือ high: H) และระดับต่ำ (-1 หรือ low: L) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปกรณีมีสองปัจจัย

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเมทริกซ์ของการออกแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปกรณีสองปัจจัย และการทดลองสองซ้ำ

Run	Factor A	Factor B	Response (Y)
1	-	-	60
2	-	-	62
3	-	+	54
4	-	+	53
5	+	-	72
6	+	-	74
7	+	+	68
8	+	+	69

จากตารางที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูป จะเห็นได้ว่าลำดับในการทดลองจะเรียงเป็นมาตรฐาน ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาของผลของปัจจัยปะปนกันในระหว่างทำการทดลองและผลจากตัวแปรถูกรบกวน เช่น ทำการทดลองอุณหภูมิในเตาในช่วงเช้า และทำการทดลองอุณหภูมิในเตาในช่วงบ่าย จะพบว่าผลการทดลองของอุณหภูมิในช่วงเช้ามีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

ช่วงบ่ายทำให้ได้ผลผลิตที่ดี แต่หากพบว่านอกจากอุณหภูมิในเตาจะมีผลต่อผลผลิตและยังมีอุณหภูมิของอากาศร่วมด้วยทำให้เกิดการปะปนกันของผลการทดลอง เพื่อขจัดปัญหาการปะปนกันของผลการทดลองนี้ควรจะจัดลำดับการทดลองแบบสุ่ม

1) การสร้างแบบจำลอง (Model Forming)

แบบจำลองจะแสดงถึงผลกระทบต่อค่าที่สังเกตได้ในสมการที่ 2.1

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.1)$$

โดยกำหนดให้

y_{ijk} = ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองที่ปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ทดลองซ้ำ k

μ = ค่าเฉลี่ยรวม

τ_i = ผลกระทบหลักของปัจจัย A ที่ระดับ i

β_j = ผลกระทบหลักของปัจจัย B ที่ระดับ j

$(\tau\beta)_{ij}$ = ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B

ε_{ijk} = ค่าส่วนตกค้างแบบสุ่มที่ได้จากการทดลองที่ปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ที่ครั้งการทดลองซ้ำที่ k

หรือสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนองในรูปแบบของเทอมที่แสดงถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ดังสมการที่ 2.2

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots \beta_k x_k + \beta_{12} x_1 x_2 + \cdots + \beta_{k-1,k} x_{k-1} x_k + \varepsilon \quad (2.2)$$

2) การกำหนดระดับปัจจัย

- แบบหน่วยที่เป็นค่าจริง (Uncoded Unit) เป็นค่าของระดับปัจจัยเป็นหน่วยจริงของปัจจัยนั้น สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการกำหนดปัจจัยแบบหน่วยค่าจริง

Run	Factor A	Factor B	Response (Y)
1	60	10	60
2	60	30	62
3	100	10	54
4	100	30	53

- แบบหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded Unit) เป็นค่ารหัสที่เกิดจากการนำค่าระดับปัจจัยจริงมาแปลงเป็นสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$x_{coded} = \frac{x_{uncoded} - \bar{x}_{uncoded}}{\frac{1}{2}range(x_{uncoded})} \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการกำหนดปัจจัยแบบค่ารหัส

Run	Factor A	Factor B	Response (Y)
1	-	-	60
2	-	+	62
3	+	-	54
4	+	+	53

จากตารางที่ 2.3 เป็นตารางแสดงปัจจัยแบบค่ารหัส ซึ่งกำหนดให้

ระดับปัจจัยสูงมีค่าเป็น (+), +1

ระดับปัจจัยต่ำมีค่าเป็น (-), -1

ในการกำหนดแบบระดับปัจจัยนั้นก็จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการออกแบบการทดลอง ซึ่งหน่วยค่าทดลองจริงจะมีความสะดวกในสมการโดยไม่ต้องแปลงสมการเป็นค่าจริง และค่ารหัสจะง่ายต่อการกำหนดปัจจัยในการทดลอง

1) การทำการทดลอง หลังจากที่ทำการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองแล้ว ลำดับถัดไปคือการออกแบบการทดลองตามแผนการทดลอง โดยจะให้ลำดับของการดำเนินการทดลองเป็นแบบสุ่ม เพื่อขจัดการปะปนของปัจจัยในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างแผนการออกแบบการทดลองแบบลำดับสุ่ม

Run	Std Order	Factor A	Factor B	Response (Y)
1	5	-	-	52
2	4	+	+	58
3	7	+	-	64
4	6	-	+	43
5	8	+	+	59
6	2	-	+	44
7	3	+	-	62
8	1	-	-	50

3) การวิเคราะห์ผลการทดลอง มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- ตรวจสอบสมมติฐาน

  - ค่าส่วนตกค้าง (Residual Analysis) คือ ความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้และค่าที่ประมาณได้จากสมการความสัมพันธ์ โดยค่าส่วนตกค้างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

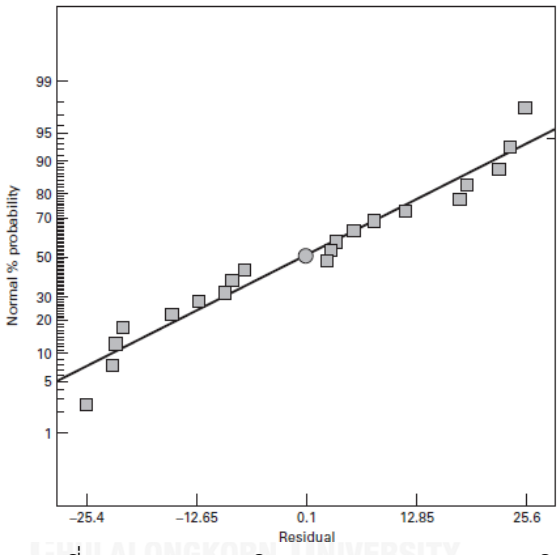
$$e = y - \hat{y} \qquad (2.4)$$

  - สมมติฐาน (Assumption)

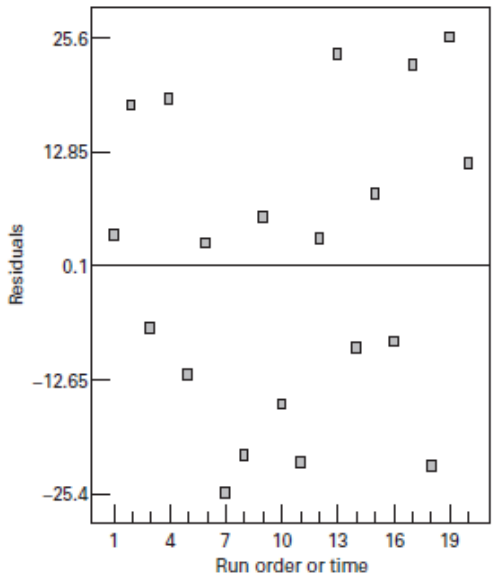
    สมมติฐานที่ 1 การแจกแจงแบบปกติ ทำได้โดยการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ซึ่งลักษณะของกราฟจะใกล้เคียงเส้นตรง ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.3

สมมติฐานที่ 2 ความเป็นอิสระของข้อมูล โดยสามารถพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการทดลอง ซึ่งกราฟจะไม่มีแนวโน้มในการเกิดข้อมูลที่อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง หรือสัญญาณอื่น ๆ ที่มีแนวโน้ม ดังรูปที่ 2.4

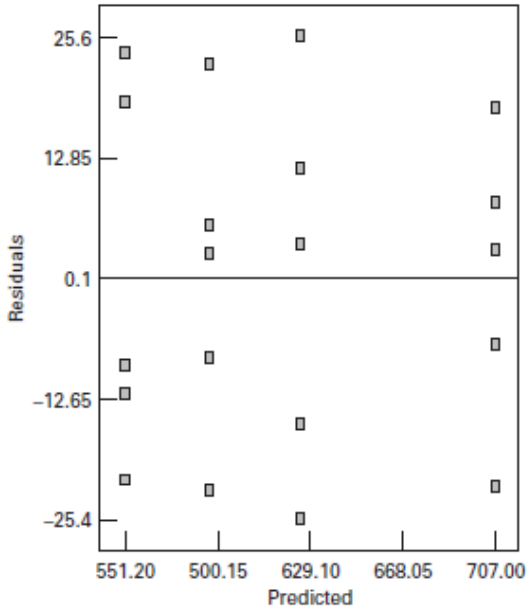
สมมติฐานที่ 3 ค่าความแปรปรวนคงที่ การทดสอบทำได้โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง และค่าฟิต ซึ่งข้อมูลที่แสดงในกราฟควรมีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 กราฟสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

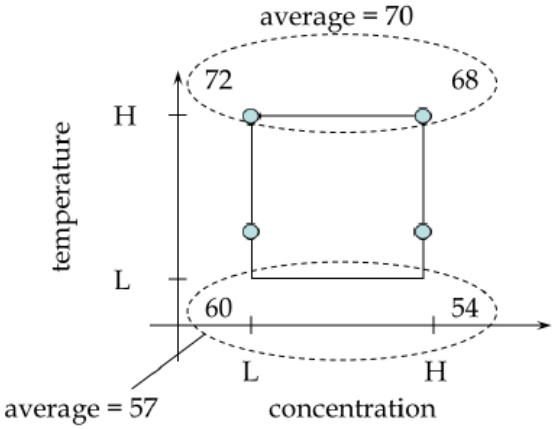


รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 2.5 กราฟค่าส่วนตกค้างที่มีความแปรปรวนคงที่

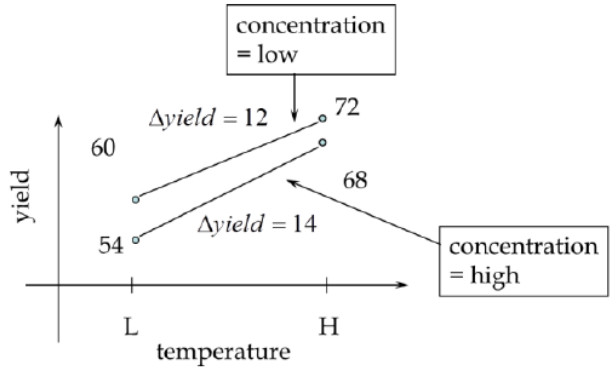
- พิจารณากราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและกราฟผลกระทบหลักของปัจจัย
  - ผลกระทบปัจจัยหลัก สามารถแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.6 ดังนี้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟแสดงผลกระทบหลัก

จากรูปที่ 2.6 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไประดับสูง จะทำให้อัตราผลิตผลดีเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 13 เปอร์เซ็นต์ และความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไประดับสูง จะทำให้อัตราผลิตผลดีเปลี่ยนแปลงลดลง 5 เปอร์เซ็นต์

- ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย สามารถแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.7 ดังนี้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 2.7 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นอยู่ที่ระดับต่ำ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบให้อัตราผลิตผลดี 14 เพิ่มขึ้น 12 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อความเข้มข้นอยู่ที่ระดับสูง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบให้อัตราผลิตผลดีเพิ่มขึ้นถึง 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าแตกต่างกัน เมื่อใช้ความเข้มข้นที่ระดับต่างกัน

- คำนวณค่าผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและผลกระทบหลักของปัจจัย
  - ผลกระทบของปัจจัยหลัก คือ ค่าที่แสดงถึงผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.5

ผลกระทบปัจจัยหลัก $= \bar{y}_{factor=1} - \bar{y}_{factor=-1}$ (2.5)

  - ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย คือ ค่าที่แสดงถึงความแตกต่างของผลกระทบของปัจจัยหนึ่งที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.6

ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย = 1/2{effect of factor 1 on response at high level of factor 2 - effect of factor 1 on response at low level of factor 2} (2.6)

- ทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบของปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (hypothesis testing)
  - ตั้งสมมติฐานในการทดสอบ
    - H_0 : ค่าผลกระทบเท่ากับศูนย์ (Effect is zero)
    - H_a : ค่าผลกระทบไม่เท่ากับศูนย์ (Effect is non-zero)
  - คำนวณค่าตัวทดสอบทางสถิติ t (Test Statistic)

$$t_{cal} = \frac{calculated\ effect}{s_{effect}} = \frac{calculated\ effect}{\sigma/\sqrt{n2^{k-2}}}$$

เมื่อ σ คือ ค่าส่วนตกค้างแบบสุ่มซึ่งประมาณได้จากผลของการทดลองซ้ำ

k คือ จำนวนของปัจจัย

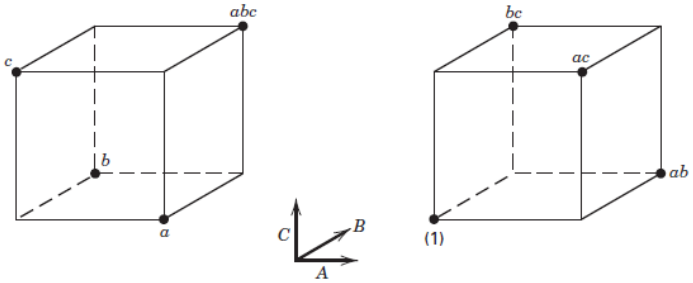
n คือ จำนวนของการทำการทดลองซ้ำ

  - ถ้า $|t_{cal}| > t_{df,\alpha/2}$ นั่นคือ ค่าผลกระทบมีผลอย่างมีนัยสำคัญ

1.2 การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial design)

เมื่อจำนวนของปัจจัยที่นำมาศึกษามีมากกว่า 3 ปัจจัย จำนวนการทดลองก็จะเพิ่มขึ้นตามแบบจำลอง 2^k ทำให้จำนวนการทดลองที่ต้องทำการศึกษานั้นมีมากขึ้นด้วยเช่นกัน หากทำการทดลองแฟคตอเรียลบางส่วนจะสามารถหาจำนวนการทดลองได้ คือ 2^{k-1} และอีก 1 ส่วนคือจุดตัดแกน ผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ลำดับขึ้นไปจะมีค่าน้อยมากหรือไม่มีนัยสำคัญ สามารถทำการ

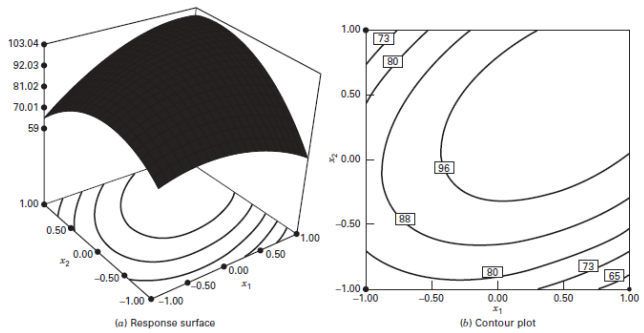
ตัดทิ้งได้ สามารถทำการทดลองเพียงแค่บางส่วนได้ การออกแบบการทดลองแบบนี้จะต้องเลือกสภาวะเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากว่าการทดลองชนิดนี้ไม่เหมาะสำหลับการหาผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ซึ่งไม่สามารถประมาณค่าได้



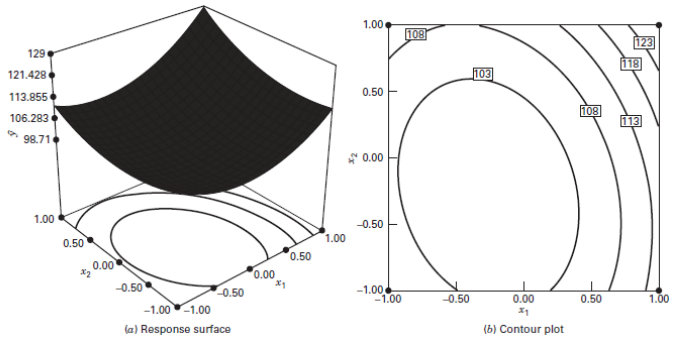
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนของการออกแบบ 2^3 ปัจจัย

1.3 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design)

การออกแบบนี้ใช้สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองตามต้องการ ซึ่งระดับปัจจัยที่ใช้ทดสอบจะใช้มากกว่า 2 ระดับ การทดลองนี้ได้แก่ แบบกำรทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน การทดลองที่มากกว่าสองระดับจะสามารถเห็นจุดที่ตัวแปรตอบสนองมีค่าสูงที่สุดหรือต่ำที่สุดได้ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 หรือที่ค่าตัวแปรตอบสนองที่ระดับที่ต้องการได้



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าสูงสุด

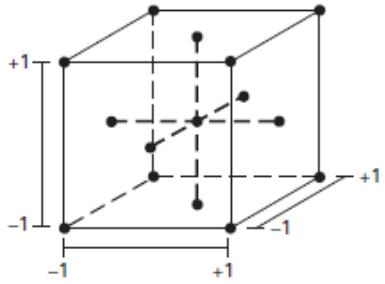


รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าต่ำสุด

1.3.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางนั้นเหมาะสมกับการสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลิโนเมียลกำลังสอง (Second-order Model) ซึ่งจะประกอบด้วยการทดลอง 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1) ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล 2^k (Factorial Runs) หรือแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{k-p}
2) ส่วนของจุดแกน (Axial Runs)
3) ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Runs)



รูปที่ 2.11 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางกรณี 3 ปัจจัย

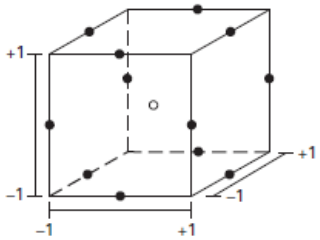
การทดลองแฟคทอเรียลจะทดลองอยู่ที่ระดับ +1 และ -1 ในส่วนของจุดศูนย์กลางใช้ระดับการทดลอง 0 ส่วนการทดลองที่ส่วนของจุดแกนจะอยู่ที่ระดับ $+\alpha$ และ $-\alpha$ โดยสามารถแสดงค่า α ได้ตามตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 ค่า α ของการการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย

จำนวนปัจจัย	ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล	ค่า α
2	2^2	1.414
3	2^3	1.682
4	2^4	2.000
5	2^5	2.378
5	2^{5-1}	2.000
6	2^6	2.828
6	2^{6-1}	2.378

1.3.1 การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบการทดลองแบบนี้จะใช้สำหรับการออกแบบการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยมากกว่า 3 ปัจจัยขึ้นไป และถูกทดลองที่ 3 ระดับ โดยจะสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลิโนเมียลกำลังสอง ซึ่งคอมบิเนชันของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองที่จุดกึ่งกลาง (Midpoints) ของแต่ละด้านและที่จุดศูนย์กลางของตัวแบบดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคนกรณี 3 ปัจจัย

ตารางที่ 2.6 เมทริกซ์การทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบอกซ์-เบห์นเคนกรณีมี 3 ปัจจัย

CCD				Box-Behnken			
Rep	x_1	x_2	x_3	Rep	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0
1	1	-1	-1	1	1	-1	0
1	-1	1	-1	1	-1	1	0
1	1	1	-1	1	1	1	0
1	-1	-1	1	1	-1	0	-1
1	1	-1	1	1	1	0	-1
1	-1	1	1	1	-1	0	1
1	1	1	1	1	1	0	1
1	-1.682	0	0	1	0	-1	-1
1	1.682	0	0	1	0	1	-1
1	0	-1.682	0	1	0	-1	1
1	0	1.682	0	1	0	1	1
1	0	0	-1.682	3	0	0	0
1	0	0	-1.682				
6	0	0	0				
Total Runs = 20				Total Runs = 15			

จากตารางที่ 2.6 เป็นการแสดงระดับการทดลองและจำนวนการทดลองของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบอกซ์-เบห์นเคนกรณีมี 3 ปัจจัย ซึ่งจะเห็นได้ว่าบอกซ์-เบห์นเคนจะมีการทดลองที่น้อยกว่าแบบส่วนประสมกลาง และในแต่ละปัจจัยจำนวนการทดลองของวิธีทั้งสองไม่เท่ากัน จะใช้วิธีการทดลองแบบใดต้องพิจารณาความเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน ในการใช้งานของ การทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบอกซ์-เบห์นเคนมีคุณสมบัติการทำนายสมการที่แตกต่างการตามปัจจัยซึ่งสามารถสรุปความแตกต่างของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบอกซ์-เบห์นเคนได้ตามตารางที่ 2.7 [10] ดังนี้

ตารางที่ 2.7 สรุปคุณสมบัติของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบอกซ์-เบห์นเคน

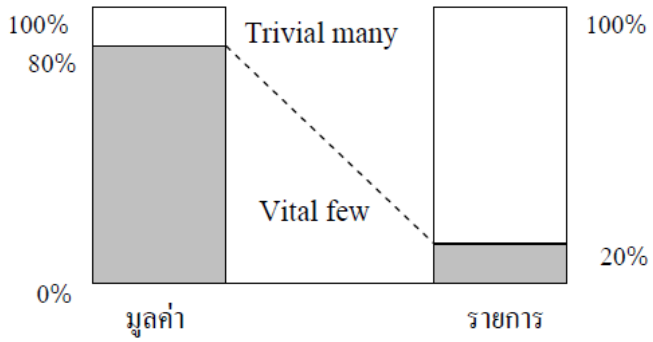
ชนิด	สรุป
การทดลองแบบส่วนประสมกลาง	- เป็นการออกแบบการทดลองที่มีคุณภาพการทำนายสูง แต่ต้องการปัจจัยที่มีช่วงการออกแบบการทดลองในส่วนของแฟคทอเรียล หมายเหตุ : เป็นไปได้ที่การออกแบบส่วนประสมกลางจะถูกยอมรับก่อนจะเริ่มการทดลองในส่วนของแฟคทอเรียลว่า ช่องว่างของปัจจัยสามารถลดลงได้รวมไปถึงทำให้เชื่อว่า $\pm\alpha$ ของแต่ละรหัสปัจจัยสอดคล้องกับของระดับปัจจัยที่เหมาะสม - ต้องการ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย
บอกซ์-เบห์นเคน	- เป็นการออกแบบที่มีทรีทเมนต์คอมบิเนชันที่น้อยกว่าการทดลองแบบส่วนประสมกลางในกรณีที่มี 3 และ 4 ปัจจัย - การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบการทดลองที่หมุนได้แต่พื้นที่ของบอกซ์-เบห์นเคนจะมีคุณภาพการทำนายไม่ดี - มุมที่หายไปอาจมีประโยชน์เมื่อการทดลองต้องการหลีกเลี่ยงทรีทเมนต์คอมบิเนชันที่สูงสุด - มีความสามารถในการทำนายสมการใกล้เคียงกับการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบเฟซเซ็นเตอร์ (Central Composite Face-Centered, CCF) [11] - ต้องการ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram)

แผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram) ได้ชื่อมาจาก วิลเฟรโด พาเรโต (Vilfredo Pareto) นักเศรษฐศาสตร์และสังคมศาสตร์ชาวอิตาลี เป็นผู้ที่คิดแผนภูมินี้ขึ้นมา และนำไปเผยแพร่ปลายศตวรรษที่ 19 โดยใช้กฎ 80/20 ซึ่งมีที่มาจากการสำรวจพบว่า ในประเทศอิตาลียุคนั้น มีคนรวย 20% คนจน 80% และใน 20% นี้ ครอบครองทรัพย์สิน 80% ขณะที่คน 80% ครอบครองทรัพย์สิน 20% ซึ่งหมายความว่าความรวยกระจุกแต่ความจนกระจายตัว แต่ความหมายนี้ไม่ได้มีเพียงแต่ประเทศอิตาลีเท่านั้นแต่ยังรวมถึงประเทศอื่น ๆ และประเทศไทยด้วย

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ [12] ได้อธิบายไว้ว่า แผนภาพพาเรโตเป็นแผนภาพที่ใช้สำหรับการจำแนกข้อมูล (Data Stratification) โดยได้ระบุว่า สิ่งที่มีความสำคัญมากจะมีจำนวนน้อยและสิ่งที่สำคัญเล็กน้อยจะมีจำนวนมาก และจึงได้เปลี่ยนใหม่ว่าเป็น สิ่งที่มีความสำคัญมากจะมีจำนวนน้อยและสิ่งที่มีประโยชน์จะมีจำนวนมาก โดยบุคคลที่ระบุเงื่อนไขนี้มีความเข้าใจผิดและได้รับการพัฒนาขึ้นภายหลังว่า เป็นหลักการสากลที่ได้รับการสังเกตหลาย ๆ วงการ แต่ในทวีปยุโรปพาเรโตถูกใช้สำหรับการคาดคะเนรายได้ของคนยุโรป และนำมาเขียนกราฟสะสมเพื่อแสดงถึงสภาพรายได้ของคนยุโรป จากกรณีศึกษาตัวอย่าง พบว่า สิ่งที่มีความสำคัญมากจะมีค่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของข้อมูลทั้งหมด ส่วนอีก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นความสำคัญเพียงเล็กน้อย จากจำนวนรายการทั้งหมดอาจเรียกหลักการพาเรโตได้ว่า หลักการ 80-20 ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างหลักการของพาเรโต 80-20

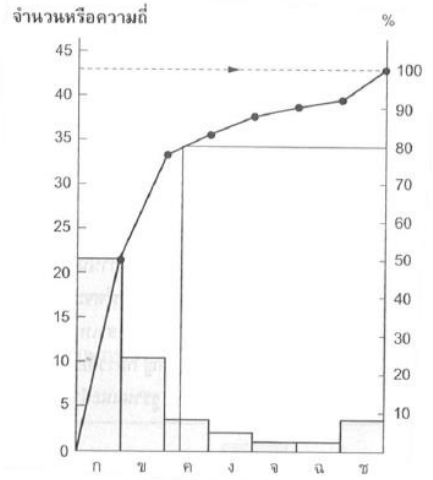
ดร.อัศม์เดช วานิชชินชัย [13] ได้กล่าวไว้ว่า พาเรโตเป็นนักเศรษฐศาสตร์ และสังคมศาสตร์ชาวอิตาเลียนและได้รับการยกย่องเป็นอย่างมาก เขามีผลงานชิ้นสำคัญแก่นักวิชาการและนักปฏิบัติการรุ่นหลังนั้นคือ “กฎของพาเรโต้ หรือ กฎ 80/20” ซึ่งก่อนหน้าพาเรโตพบว่า ที่ดินและความมั่งคั่ง 80 เปอร์เซ็นต์ของประเทศอิตาลีอยู่ในกำมือของกลุ่มคนรวยเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ ของประเทศในขณะที่คนยากจนอีก 80 เปอร์เซ็นต์ กลับมีความมั่งคั่ง 20 เปอร์เซ็นต์ ความรวยกระจุกตัวแต่ความจนกระจายนี้มิได้ปรากฏเพียงในประเทศอิตาลีเท่านั้น แต่ยังปรากฏในประเทศอื่นทั่วโลกตั้งแต่อดีตจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

แผนภูมิพาเรโต มีลักษณะคล้ายกับกราฟแท่ง (Histogram) แตกต่างกันที่แท่งของข้อมูลตามแนวแกนนอน มีค่าลดลงตามลำดับ หลักการของแผนภูมิพาเรโต ในการปรับปรุงคุณภาพ คือการหา

ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือร้อยละของปัจจัย แล้วนำมาจัดลำดับร้อยละของปัจจัยจากมากไปหาน้อย โดยแกนตั้งซ้ายเป็นค่าร้อยละของปัจจัย และแกนตั้งด้านขวาเป็นร้อยละสะสมของปัจจัย

ขั้นตอนการสร้างแผนภูมิพาเรโต [14] มีดังนี้

1. กำหนดหัวข้อที่ต้องการจะศึกษา และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ต้องการศึกษา
2. ออกแบบใบบันทึกข้อมูล เช่น วันที่ เวลา ผู้บันทึก เป็นต้น และบันทึกข้อมูล
3. จำแนกและรวบรวมข้อมูลตามสาเหตุ จากนั้นเรียงลำดับข้อมูลจากมากไปหาน้อย และคำนวณยอดรวมของข้อมูล ร้อยละของข้อมูล และร้อยละการสะสมของข้อมูลของแต่ละสาเหตุ
4. พล็อตกราฟโดยเขียนแกนตั้งด้านซ้ายเป็นร้อยละของสาเหตุ แกนตั้งด้านซ้ายเป็นร้อยละของความถี่สะสม และแกนนอนเป็นสาเหตุ โดยเขียนกราฟแท่งด้านซ้ายสุดเป็นสาเหตุที่มีความถี่สูงสุดและเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างของแผนภูมิพาเรโตของโดยเรียงสาเหตุจาก ก ถึง ช

จากรูปที่ 2.14 เป็นการแสดงตัวอย่างของแผนภูมิพาเรโต จะเห็นได้ว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของปัญหาที่ควรเริ่มแก้ไขก่อนนั้นคือปัญหา ก ข และ ค แต่หากไม่มีข้อมูลแผนภูมิพาเรโตตัดสินให้ใช้วิธีการโหวตคะแนนเสียง โดยการให้คะแนนปัญหาความรุนแรงจากมากไปน้อย

2.3.3 แผนภูมิควบคุม I-MR

แผนภูมิ I-MR หรือที่เรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า I-MR [8] ใช้เมื่อกำหนดให้กลุ่มตัวอย่างมีขนาดตัวอย่างเป็น n=1 โดยใช้ในกรณีที่

1) การผลิตที่มีอัตราการผลิตต่ำ ต้องรอเก็บตัวอย่างเป็นเวลานาน
2) การสุ่มครั้งเดียวสามารถเป็นตัวแทนของกระบวนการได้ เช่น คุณลักษณะของสารเนื้อเดียวในกระบวนการเคมี
3) การวัดค่าที่ได้จากกระบวนการที่ใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ และสามารถวัดค่าทุกชิ้นที่ผลิตได้

สามารถคำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X - MR ได้ดังนี้

• สำหรับแผนภูมิ MR (Moving Range)

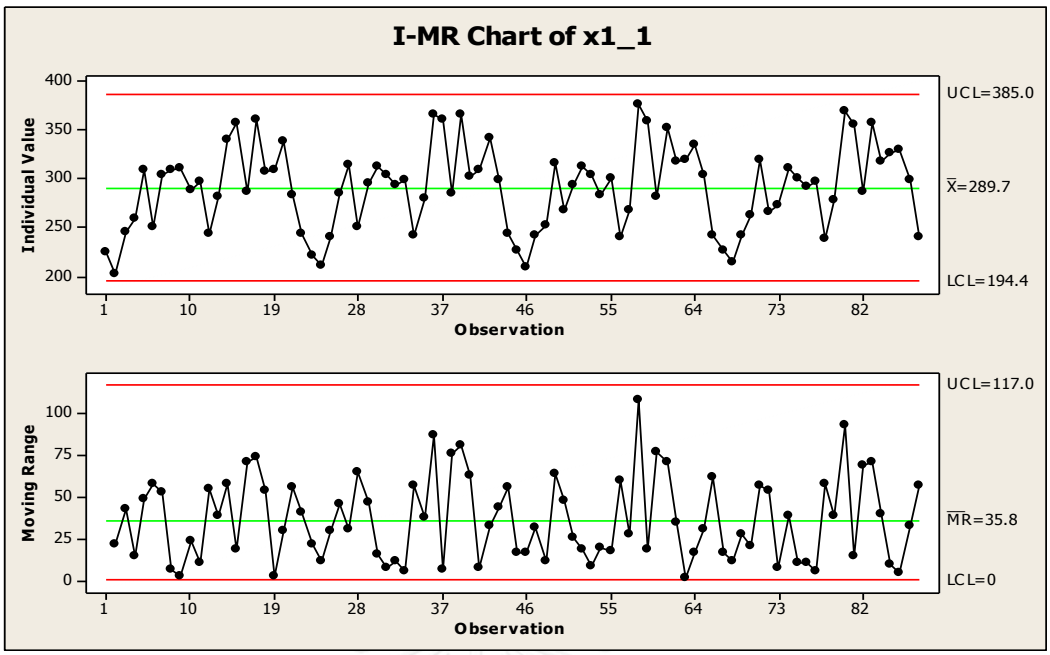
$$UCL = D_4\overline{MR}$$
$$CL = \overline{MR}$$
$$UCL = 0$$

โดย $MR_i = |x_i - x_{i-1}|$

• สำหรับแผนภูมิ x เมื่อใช้ MR

$$UCL = \bar{x} + 3\frac{\overline{MR}}{d_2}$$
$$CL = \bar{x}$$
$$LCL = \bar{x} - 3\frac{\overline{MR}}{d_2}$$

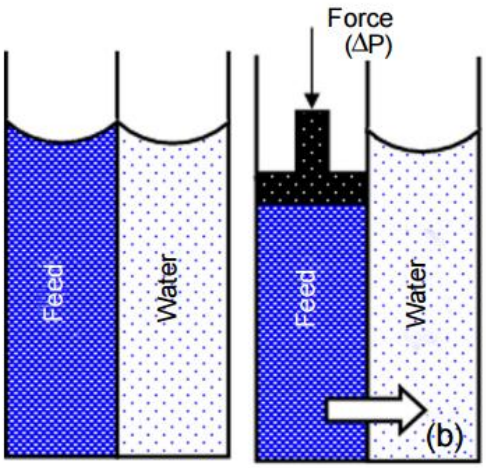
โดย $\overline{MR} = \frac{\sum_{i=1}^{m} MR_i}{m}$ และ $\frac{\overline{MR}}{d_2} = \widehat{\sigma_x}$



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างแผนภูมิ I-MR

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)

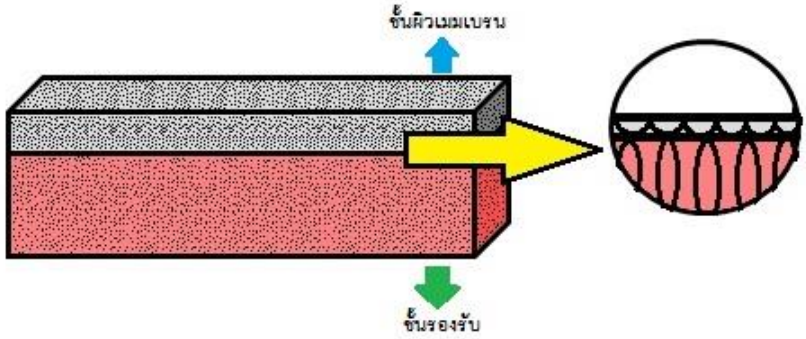
กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสจะทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นโดยการทำให้ตัวทำละลายออกมาจากตัวถูกละลายทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น [15] ดังรูปที่ 2.16 หรือเป็นกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (semipermeable membrane) แยกระหว่างตัวทำละลาย (เช่น น้ำ) ซึ่งจะถูกทำให้ไหลผ่านเมมเบรน และตัวถูกละลาย (Solute) ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (เช่น เกลือ) จะถูกเมมเบรนปฏิเสธโดยการใช้แรงดันให้สูงเกินกว่าแรงดันออสโมติกในการแยกสารละลาย (Solution) นอกจากวิธีรีเวิร์สออสโมซิสแล้วยังมีวิธีอัลตราฟิลเทชัน (Ultrafiltration) ซึ่งใช้จะสำหรับการแยกสารที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น พอลิเมอร์ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ฯลฯ ไมโครฟิลเทรชัน (Microfiltration) ใช้ได้ดีกับอนุภาคที่เป็นฝุ่นละออง และไดอะไลซิส (Dialysis) จะใช้สำหรับแยกความเข้มข้นของสารที่มีความแตกต่างกัน เช่น การวิเคราะห์เลือดในไต [16]



รูปที่ 2.16การเคลื่อนย้ายน้ำของกระบวนรีเวิร์สออสโมซิส

2.4.1 เมมเบรน (membrane)

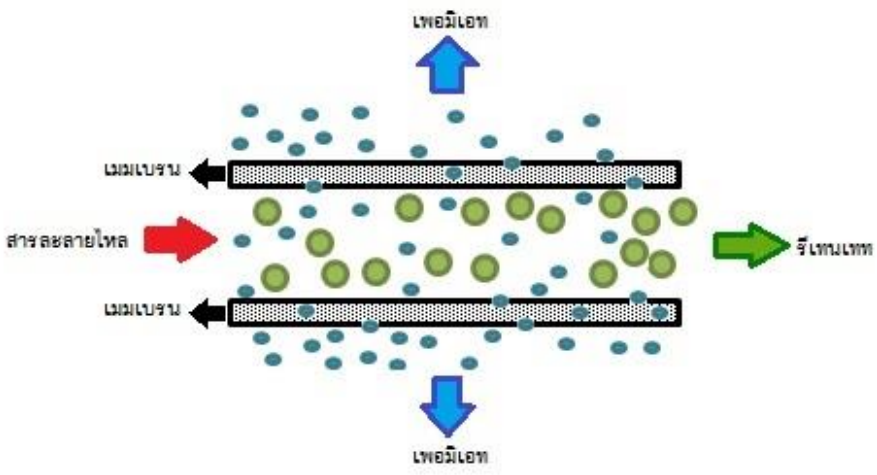
เริ่มแรกเมมเบรนถูกใช้โดยลูปและโซวาโลแกนโดยใช้เมมเบรนเซลลูโลสอะซิเตทแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Cellulose Acetate) ซึ่งประกอบด้วยชั้นบาง ๆ หลาย ๆ ชั้น ประกอบด้วยชั้นผิวที่มีโครงสร้างแน่นกว่าชั้นล่าง ดังรูปที่ 2.17 โดยชั้นผิวทำหน้าที่กักกันสาร ส่วนชั้นล่างทำหน้าที่เสริมความแข็งแรง ในแต่ละชั้นจะมีรูพรุน (Porous) มากมาย โครงสร้างของเมมเบรนสามารถแยกเกลือที่รวมตัวกันด้วยน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรน ชั้นผิวของเมมเบรนจะตอบสนองต่อความหนาแน่นของเกลือและปฏิเสธเกลือ แต่เนื่องจากว่าผิวของเมมเบรนบางมากจึงทำให้น้ำซึมผ่านออกไปได้ [16]



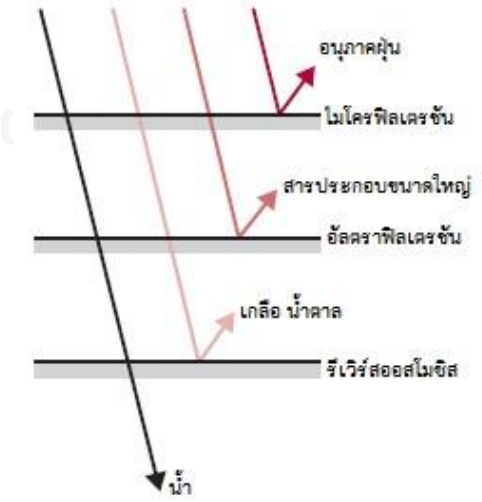
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของเยื่อเมมเบรนแบบไม่สมมาตร

ในระบบเมมเบรนจะบรรจุของไหลมากกว่า 2 ชนิด เพื่อให้สารที่สามารถไหลผ่านเมมเบรนไป (เช่น ของไหล น้ำ) เรียกว่า เพอมิเอท (Permeate) ส่วนสารที่ไม่สามารถไหลผ่านในเมมเบรนได้จะถูกกักไว้เรียกว่า รีเทนเทท (Retentate หรือ Concentrate) ทำให้เพอมิเทอมีความเข้มข้นของสารที่ชอบผ่านเมมเบรนสูง ส่วนรีเทนเททจะมีความเข้มข้นของสารที่ไม่ชอบผ่านเมมเบรนสูง ดังรูปที่ 2.18

ธรรมชาติทางกายภาพและทางเคมีของการไหลผ่านของเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับ ขนาดรูพรุน (Pore Size) การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.19 น้ำในเมมเบรนระบบรีเวิร์สออสโมซิสไหลไปรวมกับเพอมิเอทซึ่งเพอมิเอทในระบบนี้คือ เกลือและน้ำตาลไหลออกจากเมมเบรน ในส่วนของอัลตราฟิลเตรชันจะใช้แยกสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ไมโครฟิลเทรชันจะใช้ดีกับการแยกอนุภาคฝุ่นละออง [17]



รูปที่ 2.18 กระบวนการแยกสารละลายของรีเวิร์สออสโมซิส



รูปที่ 2.19 การแยกสารของเมมเบรนตามขนาดอนุภาค

ประสิทธิภาพของวิธีรีเวิร์สออสโมซิสจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเมมเบรน ชนิดของเมมเบรนที่ต้องการใช้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการซึมผ่านของตัวทำละลายและความสามารถในการไหลผ่าน

ของสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นเมมเบรนจะต้องทนต่อแรงอัดจากการใช้ความดันสูงในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส ทนต่อการเพิ่มสารเคมี ทนต่อค่าพีเอช (pH) และทนต่ออุณหภูมิสูง

2.4.1.1 ชนิดของเมมเบรนแบ่งตามวัสดุ

ในการเลือกใช้เมมเบรนจะเลือกใช้ตามลักษณะประเภทงาน ซึ่งแต่ละเมมเบรนจะประกอบไปด้วยวัสดุหลากหลายชนิดตามลักษณะของงาน แต่ในความเป็นจริงแล้วมีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบของเมมเบรนและการแบ่งชนิดของเมมเบรนจะแบ่งตามการบรรจุวัสดุในเมมเบรนที่ถูกใช้งานได้ดังนี้ [16]

1. เซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose Acetate, CA) เป็นต้นตำรับเมมเบรนและถูกใช้ทั้งรีเวิร์สออสโมซิส นาโนฟิลเทรชัน (Nano Filtration, NF) และอัลตราฟิลเทรชัน (Ultrafiltration) แต่มีข้อเสียคือจะถูกจำกัดด้วยค่าพีเอชและอุณหภูมิ ข้อดีที่สำคัญคือราคาถูก มีอายุการใช้งานยาว เซลลูโลสอะซิเตทจะชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งทำให้เมมเบรนมีโอกาสที่อุดตันได้น้อย

2. พอลิซัลโฟน (Polysulfone, PSO) ส่วนใหญ่ถูกใช้กับนาโนฟิลเทชันและอัลตราฟิลเทรชัน ข้อดีของพอลิซัลโฟนคือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงและช่วงค่าพีเอชที่สูงขึ้นพอลิซัลโฟนเป็นเมมเบรนประเภทเดียวที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

3. พอลิไวนิลลิเดนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidenedifluoride, PVDF) เป็นเมมเบรนแรกเริ่มที่เริ่มใช้ แต่ไม่นิยมใช้เพราะว่าเป็นเมมเบรนที่แยกสารเคมีได้ยาก แต่ข้อดีของเมมเบรนนี้คือทนทานต่อสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและทนทานต่อการออซิเดชัน (Oxidation) ในสิ่งแวดล้อม

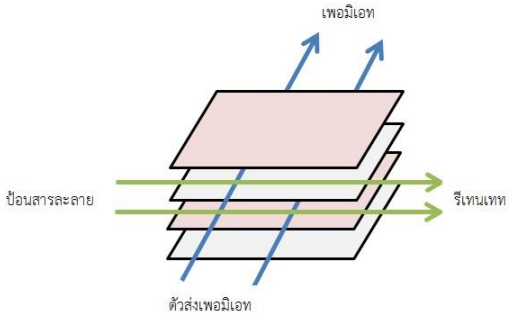
4. พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) ปัจจุบันวัสดุชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้มากกว่าเซลลูโลสอะซิเตท เพราะมีราคาถูกกว่า ทนต่ออุณหภูมิ ค่าพี่เอชและแรงกัดกร่อน

2.4.1.2 ชนิดของเมมเบรนแบ่งตามโมดูล (Module)

เมมเบรนแต่ละชนิดมีรูปร่างที่แตกต่างกัน ซึ่งในการใช้งานต้องประกอบเยื่อเมมเบรนให้มีพื้นที่ของ เมมเบรนตามที่ต้องการ ซึ่งเรียกว่า โมดูล (Module) ในการออกแบบเมมเบรนนั้นจะต้องคำนึงถึงการใช้งานเป็นหลัก เช่น มีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่พื้นผิวหน้าเยื่อเมมเบรน โมดูลที่ใช้กันในระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้ [17]

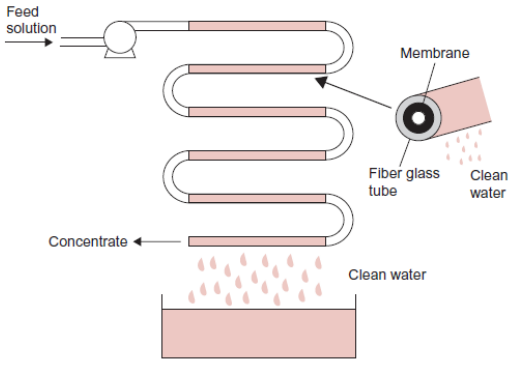
1. โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (The plate and frame) เป็นเมมเบรนที่ประกบกันเป็นคู่หลาย ๆ คู่เข้าด้วยกัน การทำงานของโมดูลชนิดนี้จะใช้แผ่นกั้น (Spacer) ที่เกิดจากการประกบกับเมมเบรนทำให้สารไหลผ่านแผ่นกั้น มีอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของรีเทนเทท เพอมิเอท และเพื่อให้เป็นระบบที่ปิดสนิท เมมเบรนชนิดนี้มีการสร้างพันธะบนที่

ที่มีรูพรุนโดยบนแมมเบรนจะมีสารที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเพื่อเป็นตัวต้านทางต่อการไหลของของไหล การไหลของรีเทนเททจะถูกบังคับให้ไหลตามช่องที่ถูกบังคับไว้ ตามรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โมดูลแบบแผ่นและกรอบ

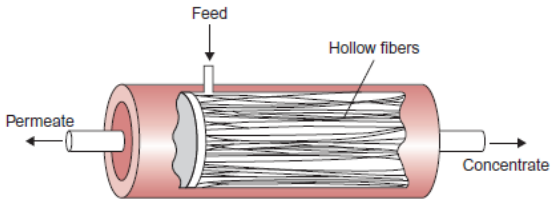
2. โมดูลแบบท่อ (Tubular) เป็นโมดูลชนิดแรกของระบบรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งในเมมเบรนประกอบด้วยท่อหลาย ๆ ท่อที่มีรูพรุนที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุของเมมเบรน เช่น เซลลูโลสอะซิเตท โดยทั่วไปสารละลายจะถูกปั๊มให้ไหลตามแนวท่อและสารละลายจะถูกแรงทำให้ไหลผ่านรูพรุนภายในท่อของเมมเบรน โดยสายที่ซึมผ่านเมมเบรนออกมาจากพื้นที่ผิวภายนอกจะเรียกว่า เพอมิเอท และสารที่ไม่สารมารถซึมผ่านออกมาจากเมมเบรนได้จะเรียกว่า รีเทนเทท ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โมดูลแบบท่อ

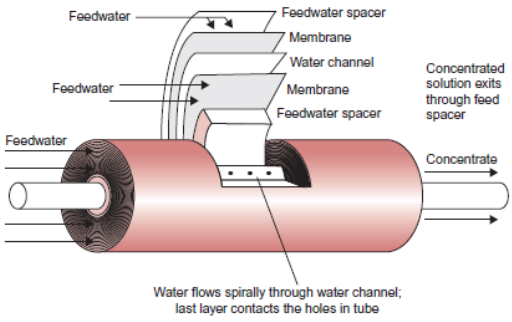
3. โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow-Fiber) ทำจากอะรามิด (Aramid) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 40 ไมโครเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 85 ไมโครเมตร จำนวนเส้นใยนับล้านเส้นถูกมัดใส่ในท่อและมัดจับด้วยอีพอกซี (Epoxy) เส้นใยเหล่านี้จะทำให้เกิดพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ทำให้ในระบบมีความแน่นของเส้นใยที่อัดแน่นภายในท่อ การไหลของโมดูลนี้จะเริ่มจากการไหลที่เริ่มป้อนสารละลาย เพอมิเอทไหลผ่านที่ว่างรอบนอกของเส้นใยไปยังพื้นที่

ด้านในของเส้นใยและเคลื่อนย้ายไปยังตัวดักเพอมิเอทและปล่อยออกจากท่อ ส่วนรีเทนเททที่อยู่รอบ ๆ เส้นใยและถูกขับออกจากท่อ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 โมดูลแบบเส้นใยกลวงแบบป้อนสารด้านในใย

4. โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound) เป็นการนำเมมเบรนแผ่นเรียบมาม้วนรอบแกน โดยต้องมีแผ่นกั้น โมดูลชนิดนี้มีลักษณะที่ค่อนข้างซับซ้อน โมดูลชนิดนี้เป็นการพื้นที่ผิวของเมมเบรนรูปร่างภายนอกของโมดูลชนิดนี้จะคล้ายกับโมดูลแบบท่อ ชั้นของเมมเบรนประกอบด้วยพลาสติกที่เป็นตาข่ายและแผ่นที่มีรูพรุน และชั้นของเมมเบรนที่มีแผ่นรูพรุนประกอบไปด้วยชั้นเมมเบรน 5 ชั้น ที่ล้อมรอบไปด้วยท่อที่มีรูพรุน ชั้นสุดท้ายจะถูกหุ้มด้วยตัวบรรจุเพื่อไม่ให้สารไหลออกไปข้างนอก ดังรูปที่ 2.23

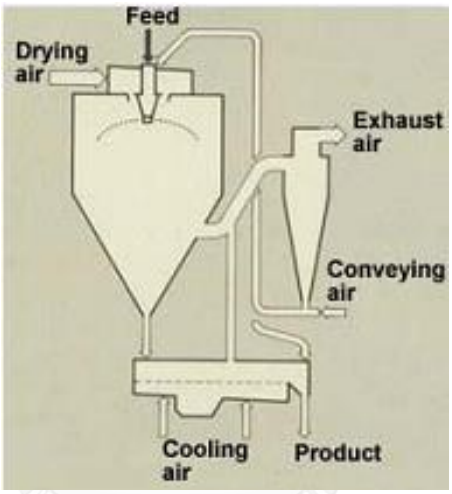


รูปที่ 2.23 โมดูลแบบท่อม้วน

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนทำให้แห้งแบบพ่นฝอย (Spray Drying)

กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีที่เปลี่ยนสถานะของเหลวหรือสารเนื้อผสมให้เป็นของแข็งโดยมีลักษณะเป็นผงแห้งซึ่งสามารถทำได้โดยการพ่นของเหลวของเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอย ทำให้ของเหลวที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีด (Nozzle) เป็นละอองและถูกให้ความร้อนจากแก๊สที่ถูกปล่อยออกมาจนน้ำที่อยู่ในของเหลวระเหยหมดไปจึงเกิดเป็นผง สามารถแสดงรูปของการทำให้

แห้งแบบพ่นฝอยได้ดังรูปที่ 2.26 ของเหลวที่ถูกพ่นจนกลายเป็นหยดของเหลวที่ข้างบนแชมเบอร์ (Chamber) ทำให้อากาศร้อนที่อยู่ข้างบนแชมเบอร์กับหยดของเหลวที่ไหลไปทางเดียว (Co-Current Flow) เกิดการชนจนกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ของเหลวถูกทำให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนโมเลกุลเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สแล้วจึงกลายเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นผงและเคลื่อนย้ายไปไซโคลนเพื่อจะออกจากแชมเบอร์ เครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยทุกชนิดมีหลักการทำงานที่เหมือนกันแต่จะแตกต่างกันตรงการออกแบบรูปลักษณ์ภายนอกของแชมเบอร์ หัวฉีด ไซโคลน (Cyclone) ฟลูอิดเบด (Fluid Bed) ระบบการไหลของอากาศ ตัวกรองอากาศ ฯลฯ โดยขนาดของเครื่องจะขึ้นอยู่กับการใช้งานตามอุตสาหกรรมและอัตราการระเหยน้ำ [18]



รูปที่ 2.24 เครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยแบบมีฟลูอิดเบด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.1 แชมเบอร์ (Chamber)

แชมเบอร์เป็นห้องที่ทำให้ของเหลวเปลี่ยนไปเป็นของแข็งในลักษณะที่เป็นผง โดยภายในแชมเบอร์จะมีหัวฉีดและอากาศร้อนที่ไหลมจากแหล่งกำเนิดความร้อนและวนอยู่ภายในแชมเบอร์ที่พาผงลงสู่ฟลูอิดเบดที่อยู่ข้างล่างแชมเบอร์ ในแชมเบอร์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 2.25 ในส่วนแรกเป็นส่วนที่อยู่รอบ ๆ หัวฉีด ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีทั้งหยดของเหลวและผงที่มีฝุ่นละอองปะปนอยู่ด้วย แล้วฝุ่นละอองจะเคลื่อนที่ไปตามช่องอากาศออกต่อไป ในส่วนที่สองเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างหยดของเหลวที่ออกมากจากหัวฉีดและผงที่จะลงไปสู่ฟลูอิดเบด ซึ่งในส่วนนี้จะมีส่วนที่เป็นผงที่มีความชื้นและผงที่แห้งแต่ส่วนมากแล้วจะเป็นผงที่แห้งแล้วและจับกลุ่มกันลงไปสู่ฟลูอิดเบดต่อไป และในส่วนที่สามเป็นส่วนสุดท้ายที่ผงมีความเสถียรในฟลูอิดเบดซึ่งผงจะใช้เวลาอยู่ในส่วนนี้นานที่สุดเพื่อทำให้ผงที่เป็นผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพ [19]

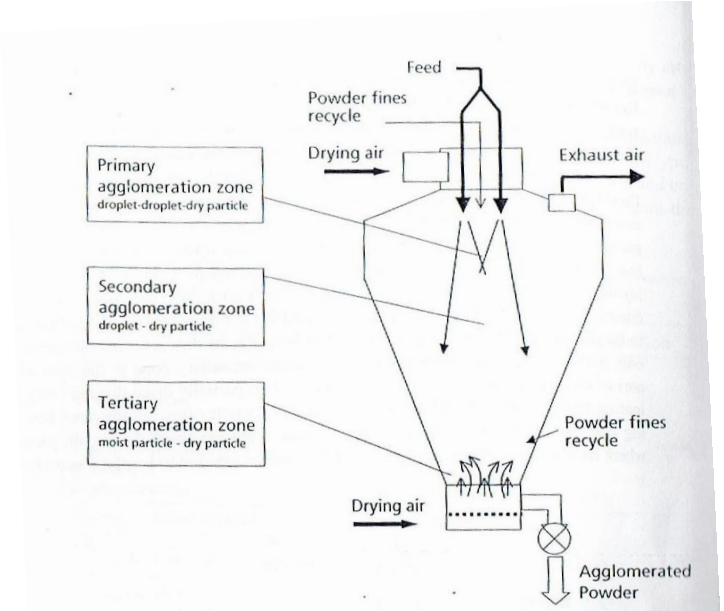


Figure 2.25. Agglomerating Zones in a Mixed Flow Spay Drying Chamber with Fluid Bed Internally Mounted at the Base of the Chamber Cone.

รูปที่ 2.25 ขอบเขตภายในแชมเบอร์

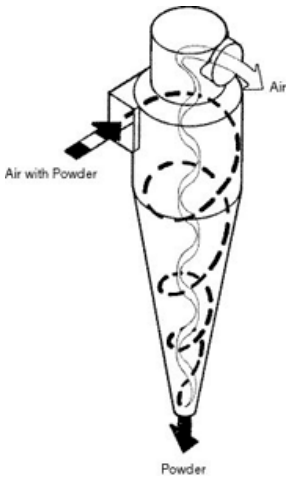
2.5.2 หัวฉีด (Nozzle)

เครื่องสเปรย์ดายสามารถเปลี่ยนสารละลายที่เป็นของเหลวเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นผง โดยการพ่น การกำหนดขนาดของหัวฉีดจะขึ้นอยู่กับขนาดของผงที่ต้องการ นอกจากนี้ปริมาณของเหลว ขนาดหยดของเหลว ความหนืดของของเหลว อนุภาคของของเหลวทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นปัจจัยในการตัดสินใจสำหรับการเลือกขนาดของหัวฉีด โดยทั่วไปหัวฉีดจะออกแบบการใช้งานในแชมเบอร์ซึ่งจะให้ปล่อยของเหลวในลักษณะหมุนดังรูปที่ 2.26 [19]

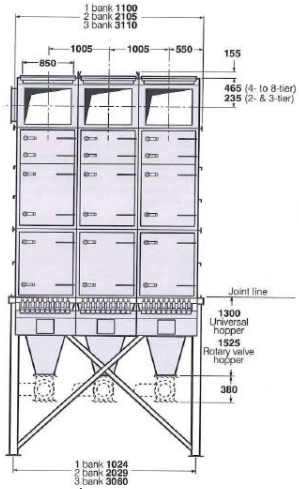
รูปที่ 2.26 ลักษณะการพ่นของเหลวของหัวฉีด

2.5.3 ไซโคลน (Cyclone)

ผงที่ออกมาจากแชมเบอร์จะมีลักษณะเป็นอนุภาคหยาบ (Crude Particle) ส่วนผงที่ออกมาจากไซโคลนจะมีลักษณะที่เป็นอนุภาคละเอียด (Fine Particle) และมาพร้อมกับฝุ่นละออง (Dust) ในไซโคลนนี้จะเป็นส่วนที่ทั้งเพิ่มผงที่มีอนุภาคหยาบและลดฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคละเอียด โดยหลักการทำงานของเครื่องนี้คือ ใช้แรงลมที่มาจากเศษผงฝุ่นที่ออกมาจากแชมเบอร์พาเศษผงฝุ่นเข้าสู่ไซโคลน และเมื่อเข้าสู่ไซโคลนจะเกิดแรงลมหมุนพาเศษผงฝุ่นที่มีอนุภาคหยาบติดมาด้วยแล้วพาลงไปข้างล่างและย้อนกลับเข้าสู่แชมเบอร์เพื่อให้อนุภาคหยาบนี้กลับเข้าสู่กระบวนการการระเหยน้ำจนทำให้เกิดผง ดังรูปที่ 2.27 ส่วนอนุภาคละเอียดที่หลุดจากแรงลมหมุนจะลอยขึ้นสู่ข้างบนไซโคลนเพื่อเข้าสู่ถุงกรอง (Bag Filter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการแยกฝุ่นผงออกจากลมที่ออกมาจากไซโคลนอีกครั้งก่อนให้ลมออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 ไซโคลน



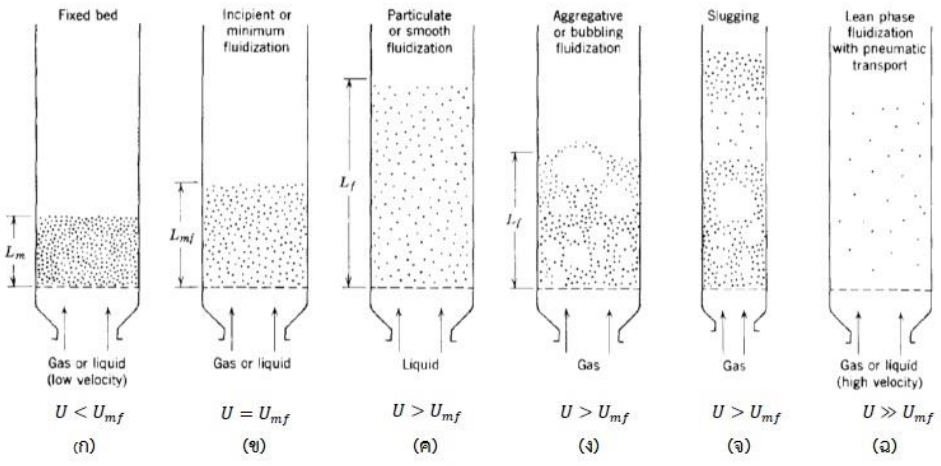
รูปที่ 2.28 ถุงกรอง

2.5.4 ฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidize Bed)

เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดมีหน้าที่ช่วยให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดโดยที่มีส่วนที่สัมผัสกับลมร้อนทำให้อนุภาคลอยตัวเป็นอิสระ อนุภาคของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่ของไหลที่ใช้จะถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับอนุภาคของแข็ง แล้วจะไหลผ่านออกทางส่วนบนของแชมเบอร์เรียกว่า กระบวนการฟลูอิไดเซชัน (Fluidization)

ขั้นตอนของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดเริ่มจากผงใส่ไหลลงมากจากส่วนช้างบนแชมเบอร์ แล้วปล่อยให้ลมร้อนเป่าเข้าทางด้านล่างของแชมเบอร์ขณะที่ลมเป่ามีความเร็วต่ำผงจะไม่ขยับ ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed Bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ก ทั้งนี้ความเร็วในการไหลตามผิว

(Superficial Velocity, U) จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum Fluidizing Velocity, Umf) ถ้าเพิ่มลมร้อนให้มากขึ้นจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง ผงเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่า ฟลูอิไดเซชันต่ำสุด (Incipient or Minimum Fluidization) ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ข สำหรับฟลูอิไดเซชันของเหลวเมื่อเพิ่มลมร้อนจนกระทั่งการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของผงจะเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกว่า เบดสม่ำเสมอ (Particulate or Smooth Fluidization) ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ค หากเพิ่มลมร้อนขึ้นไปอีกจะไปทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของลมร้อน เบดลักษณะนี้เกือบจะพาเอาอนุภาคออกไปจากแชมเบอร์ จึงเรียกว่า เบดเจือจาง (Diluted Phase Fluidized Bed) หลังจากนั้นหากเพิ่มลมร้อนอีกเล็กน้อยอนุภาคของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากแชมเบอร์ไปซึ่งในลักษณะนี้จะถือเป็นการขนถ่ายแบบใช้ลม (Pneumatic Conveyor) ดังแสดงในในรูปที่ 2.29 ง หากส่งถ่ายผงด้วยของเหลวก็จะเรียกว่า การขนถ่ายด้วยของเหลว (Hydraulic Transport) ก๊าซฟลูอิไดเซชันจะมีลักษณะเบดที่แตกต่างไปจากของเหลวเมื่อเพิ่มลมร้อนของก๊าซสูงกว่าลมร้อนที่จะทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของผงเหมือนเดิม อีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซเหล่านี้จะแทรกตัวขึ้นมายังผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมานี้จะทำให้อนุภาคของแข็งไหลจากส่วนบนของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง โดยบางส่วนของผงจะลอยติดตามฟองก๊าซไปด้วยลักษณะดังกล่าวทำให้ภายในเบดจะมีการเคลื่อนที่อย่างชุลมุนเบดชนิดนี้เรียกว่า เบดวุ่นวาย หรือฟลูอิไดเซชันวุ่นวาย (Aggregative or Bubbling Bed) ดังแสดงในรูป 2.29 จ และ 2.29 ฉ โดยฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของผง ลมของก๊าซ และลักษณะของแผ่นกระจายอากาศ [20]



รูปที่ 2.29 กระบวนการฟลูอิไดเซชัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรีเวิร์สออสโมซิส

กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสของสีเป็นกระบวนการที่แยกสีหรือคอนเซนเทรทออกจากตัวทำละลายหรือเพอมิเอต งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มผลิตภาพของสีดีดายซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้ผลิตภาพเพิ่มขึ้นในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสคือ ปริมาณเนื้อสีในน้ำ (Solid Content) สิ่งที่สัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณเนื้อสีในน้ำคือการเพิ่มความเข้มข้นคอนเซนเทรท โดยเมื่อเริ่มเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแล้วจะเกิดขั้นตอนการกำจัดเกลือโดยการเติมน้ำเพื่อทำให้เกิดการกระบวนการกำจัดน้ำและเกลือจำพวกเกลือคลอไรด์แล้วจึงเริ่มมีเพอมิเอตไหลออกจากเมมเบรนออกไปจนได้คอนเซนเทรทค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดเดินเครื่อง หลังจากที่เสร็จสิ้นขั้นตอนกำจัดเกลือแล้วต้องทำการล้างเมมเบรน (Washing Membrane) เพื่อล้างสีที่ติดอยู่ภายในเมมเบรนแล้วจึงทำการล้างระบบ (Washing Process) เพื่อไล่สีที่ติดอยู่ในระบบไปรวมกับสีที่พร้อมทำการสเปรย์โดย ประสิทธิภาพเมมเบรนไม่เกี่ยวข้องกับการทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำลดลง (Total Dissolve Solid) แต่สิ่งที่ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำลดลงคือ [21] ปริมาณของน้ำล้างเมมเบรนซึ่งผู้วิจัยได้เพิ่มปริมาณของน้ำพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (Total Solid Dissolve) ลดลงอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของแข็งในน้ำจะมีทั้งสาร (Matter) ที่อยู่ในน้ำทั้งที่ละลายในน้ำได้ (Dissolved Solids) หรือที่เป็นสารแขวนลอย (Suspended Solids) [22] นั่นหมายความว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำลดลงปริมาณของแข็งในน้ำจะลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่ง S. Shang [23] ได้กล่าวว่า การใช้น้ำล้างในระบบและส่งไปรวมกับสีส่งผลโดยตรงต่อปริมาณเนื้อสีในน้ำซึ่งทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำให้ลดลงได้และยังลดความหนืดของสี นอกจากนี้การใช้น้ำมากเกินไปยังส่งผลให้เกิดสิ่งสกปรกต่อสี [24] และนอกจากนี้พบว่า ความเข้มข้นคอนเซนเทรทของสีขึ้นอยู่กับน้ำล้างเมมเบรน ซึ่งได้พบว่า 85 เปอร์เซ็นต์ปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยเนื่องจากว่ามีปริมาณน้ำล้างระบบมากแล้วไหลไปรวมกับสี แต่ในสีมีเนื้อสีเท่าเดิมทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยลงจากการใช้น้ำล้างสีในระบบ [25]

จึงเป็นที่น่าสนใจว่าการกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ล้างเมมเบรนและล้างระบบมีผลต่อปริมาณเนื้อสีในน้ำมากเนื่องจากว่าน้ำที่ใช้ในการล้างจะไปรวมกับของเหลวที่มีอยู่เดิมทำให้ของเหลวมีปริมาณน้ำมากขึ้นแต่เนื้อสียังเท่าเดิมจึงส่งผลให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำลดลง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย

ยังไม่มีการศึกษางานวิจัยที่ของกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ในกระบวนการผลิตสีย้อมผ้า แต่เครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยาซึ่งมีหลักการดำเนินงานคือ คือ การเปลี่ยนสถานะของเหลวโดยอาศัยความร้อนของอากาศในแชมเบอร์ให้เป็นผงและปัจจัยในการตั้งค่าเครื่องจักรเหมือนกระบวนการผลิตสี โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเพิ่มผลิต

ภาพของสีดีดายโดยการให้ปริมาณวัตถุดิบคงที่แต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นและนอกจากนี้ยังสามารถลดรอบเวลาการผลิตของสีลงได้อีกด้วย ซึ่งหลังจากที่สีเสร็จสิ้นจากขั้นตอนรีเวิร์สออสโมซิสแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเพื่อทำการสเปรย์สี ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาหางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยได้ดังต่อไปนี้

Y. Cai และ H. Corke [26] ได้ทำการศึกษาวิจัยในเรื่องการเพิ่มผลิตภาพของผงสีจากการสกัดของ Amaranthus Betacyanin ในอาหาร โดยได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย แล้วจึงทำการศึกษาปัจจัยเรื่อง อุณหภูมิท่อนำเข้า (150 $^{\circ}$C-210 $^{\circ}$C) นำเข้าภายใต้อัตราการระเหย ความดัน อุณหภูมิท่อนำออก (87 $^{\circ}$C-115 $^{\circ}$C) เดียวกัน อัตราการระเหย (307 กรัม/ชั่วโมง-23 กรัม/ชั่วโมง) และปริมาณของแข็งในน้ำ (10.5% - 39.2%) กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ คือ อุณหภูมิท่อนำเข้า และอัตราการป้อน (390 กรัม/ชั่วโมง-530 กรัม/ชั่วโมง)

ผลการทดลองพบว่า หากจะเพิ่มผลิตภาพของผงสีเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ การเพิ่มอุณหภูมิท่อนำเข้านอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการป้อนสารดังรูปที่ 2.30 อัตราการระเหยที่สูงขึ้นและทำให้สามารถสเปรย์สารได้เร็วขึ้นและยังช่วยเพิ่มผลิตภาพ [27, 28] และหากเพิ่มผลิตภาพจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในผงสีลดลง 4.7% ในทางเดียวกันนี้เองการเพิ่มของปริมาณของแข็งในน้ำสามารถเพิ่มผลิตภาพของสีได้อย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการระเหยเดียวกัน [29, 30]

Table 2—Effect of spray drying temperature and feed solid content on drying rate, productivity and characteristics of *Amaranthus* pigment powders[a]

Inlet-air temperature (°C)[b]	Feed solid content (%)	Powder moisture (%)	Drying ratio	Drying rate (g/hr)	Productivity (g/hr)	Bulk density (g/ml)	Hygroscopic moisture (g/100g)	Drying loss of pigment (%)	Retention of pigment at 16 wk (%)[c]
150	19.8	6.80±0.60	4.71	306.8	82.8	0.67±0.010	46.0	2.77±0.17	88.2±0.8
165	19.8	4.53±0.75	4.82	336.6	88.1	0.63±0.007	45.4	3.85±0.18	88.6±0.6
180	19.8	2.88±0.21	4.91	366.1	93.8	0.58±0.010	49.2	4.14±0.30	86.7±1.3
195	19.8	1.98±0.18	4.95	395.1	100.0	0.54±0.015	48.5	6.08±0.37	84.2±0.6
210	19.8	2.13±0.34	4.94	423.0	107.3	0.52±0.008	48.2	7.66±0.51	84.5±1.0
180	10.5	1.95±0.00	9.34	410.7	49.2	0.55±0.015	49.5	5.31±0.47	84.8±1.0
180	30.0	3.67±0.56	3.21	316.7	143.2	0.63±0.008	45.3	3.96±0.61	88.6±1.3
180	39.2	3.24±0.62	2.47	273.6	186.3	0.64±0.010	44.6	3.73±0.17	89.8±0.7
Freeze drying (ck1)	19.8	1.25±0.08	—	—	—	—	50.7	0.00	87.6±0.6
Freeze drying (ck2)	6.0	5.67±0.80	—	—	—	—	118.3	—	77.3±0.6
LSD ($P < 0.05$)[d]	—	—	—	—	—	0.025	3.4	0.96	2.1

[a] Feed solutions for spray drying were made from pigment extracts and 15 DE maltodextrin.
[b] ck1 with 15 DE maltodextrin, ck2 (pure betacyanin extracts) without adding maltodextrins.
[c] Powder samples stored at 25 °C and 32% RH.
[d] Least significant difference for comparison of means in the same column.

รูปที่ 2.30 ผลกระทบอุณหภูมิเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยและอัตราการป้อนของแข็งในน้ำบนอัตราการระเหยเดียวกันต่อการเพิ่มผลิตภาพ

นอกจากนี้การเพิ่มของอัตราการป้อนสารและอัตราการระเหยสามารถเพิ่มได้จากการเปลี่ยนขนาดหัวฉีดให้ใหญ่ขึ้นแต่จะทำให้สารที่ถูกพ่นออกมาทางหัวฉีดจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ [19] M. Maury และคณะ [31] ได้ทำการทดลองในการการเพิ่มขนาดหัวฉีดเพียงเล็กน้อยจาก 17.3 - 19.4

μm พบว่าเพียงแค่เพิ่มขนาดหัวฉีดเพียงเล็กน้อยนั้นสามารถเพิ่มผลผลิตที่เป็นผงได้และนอกจากนี้ยังสามารถลดความชื้นในผงได้ แต่หากเพิ่มขนาดหัวฉีดมากเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียของผงเนื่องจากว่าอัตราการป้อนสารมากเกินไปทำให้มีการระเหยของน้ำในผงไม่ทันทำให้เกิดการสูญเสียวัตถุดิบ แต่ T. Jamaleddine และคณะ [32] ได้ทำการทดลองหาขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมในการสเปรย์ของเหลว ซึ่งได้ศึกษาขนาดหัวฉีด ได้แก่ ช่วงขนาด 0.85 มิลลิเมตร – 2 มิลลิเมตร ช่วงขนาด 2 มิลลิเมตร – 4 มิลลิเมตร และขนาด 4 มิลลิเมตรขึ้นไปซึ่งพบว่า หัวฉีดขนาด 0.85 มิลลิเมตร – 2 มิลลิเมตร ได้ปริมาณผงมากที่สุด และยังลดผงขนาดมาโครแอกโกเมอเรต (Macro-Agglomerate) ดังรูปที่ 2.31 นอกจากนี้ยังสามารถลดอนุภาคละเอียด (Fine Particle) ได้อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Chawla และคณะ [33] ได้ทำการทดลองหัวฉีดที่ใช้ในการสเปรย์จากขนาด 4.4 μm และ 4.7 μm พบว่าขนาดหัวฉีด 4.4 μm ได้ผลผลิตที่มีลักษณะเป็นผงมากกว่าขนาดหัวฉีด 4.7 μm ซึ่งคาดว่าหัวฉีดขนาด 4.4 μm

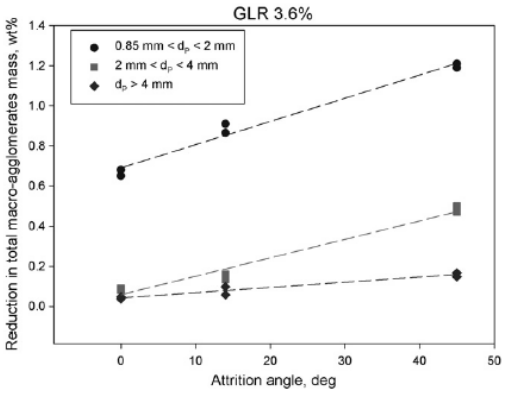
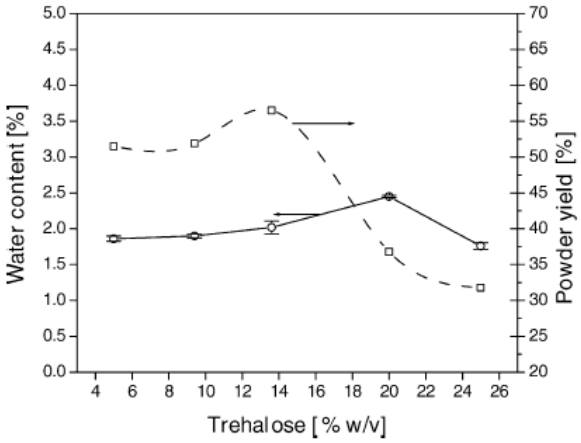


Fig. 9. Relative reduction in macro-agglomerates mass vs. the attrition angle for GLR = 3.6%.

รูปที่ 2.31 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณของแข็งในน้ำ

ผลกระทบของปริมาณของแข็งในน้ำที่กล่าวไปข้างต้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลิตภาพมาก โดย M. Maury และคณะ [31] ได้ทำการทดลองเปลี่ยนปริมาณของแข็งในน้ำคือ 5-25% ดังรูปที่ 2.32 พบว่า มีการเพิ่มผงในช่วงการเพิ่มปริมาณของแข็งในน้ำตั้งแต่ในช่วง 5-14% และตั้งแต่ช่วง 15-25% ผงลดลงเนื่องจากว่ามีการเพิ่มปริมาณของแข็งในน้ำก็เหมือนเพิ่มความเข้มข้นของสารทำให้สารมีความหนืดมากขึ้นทำให้การสเปรย์สารเกิดการเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดช้าและยากขึ้น และการเพิ่มปริมาณของแข็งในน้ำที่มากเกินไปทำให้สารมีอนุภาคใหญ่จึงทำให้ที่ทำให้ลดอัตราการป้อนสารมากขึ้น [34, 35]



รูปที่ 2.32 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณของแข็งในน้ำ

การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจากข้างใต้แชมเบอร์ที่เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed) จะทำให้มีผลิตภาพเพิ่มขึ้นโดยจะช่วยทำให้เนื้อสีแห้งได้เร็วขึ้นโดยใช้ลมร้อนเป่าผ่านชั้นวัสดุ (Bed) และทำให้วัสดุลอยตัวเป็นอิสระเกิดการคลุกเคล้าสัมผัสกับลมร้อนอย่างสม่ำเสมอ และกักวัสดุที่ลอยตัวจนวัสดุมีน้ำหนักจำนวนหนึ่งแล้วปล่อยลงมายังส่วนบรรจุภัณฑ์ซึ่งมีงานวิจัยของ M. Fuchs และคณะ [36] ได้ลองสภาวะเงื่อนไขของการสเปรย์อาหารกับสารจำพวกอิมัลชัน (Emulsion) ได้แก่ สภาวะ A คือ การทำให้แห้งแบบพ่นฝอยของอาหารที่มีอิมัลชั่น สภาวะ B คือ การรวมตัวของผงที่ถูกสเปรย์ และสภาวะ C การรวมตัวของมัลโทเด็กตริน (Maltrodextrin) กับอิมัลชั่น พบว่าการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยที่มีการเพิ่มอุณหภูมิที่ฟลูอิดไดซ์เบดให้ผลผลิตที่สูงกว่าการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. Link และ E. Schlunder [37] ซึ่งได้ทำการศึกษาการใช้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนที่ฟลูอิดไดซ์เบดของสารเคลือบผิว (Coating) พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณผงได้ ลดเวลาในการผลิตลงได้เนื่องสารเคลือบผิวได้รับความร้อนเพิ่มจากส่วนของฟลูอิดไดซ์เบดทำให้น้ำระเหยไปอย่างรวดเร็วและผลของการกักเบดเพิ่มอุณหภูมิที่ฟลูอิดไดซ์เบดอีกอย่างหนึ่งพบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น [34]

จากงานวิจัยข้างต้นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มผลิตภาพคือ อุณหภูมิท่อนำเข้า จำนวนหัวฉีด ขนาดหัวฉีด ปริมาณของแข็งในน้ำ และอุณหภูมิอากาศร้อนที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองแล้วว่ามีผลต่อการเพิ่มผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิท่อนำเข้าทางผู้วิจัยไม่สามารถเพิ่มได้เนื่องจากว่าได้มีการปรับเพิ่มสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถจะรับได้ จึงเป็นที่น่าสนใจจะนำปัจจัย ขนาดหัวฉีด ปริมาณของแข็งในน้ำ และอุณหภูมิอากาศร้อนมาทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องเพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีต่อไป

บทที่ 3
ขั้นตอนการนิยามปัญหา

ขั้นตอนนี้เป็นการระบุปัญหาปัจจุบัน ขอบเขต วัตถุประสงค์ เงื่อนไข และสมมติฐานของโครงการปรับปรุงคุณภาพ รวมทั้งกำหนดทีมงานปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของการทำวิจัย โดยใช้หลักการของซิกซ์ ซิกมา เพื่อนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาและปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามเป้าหมายและความพึงพอใจของลูกค้า โดยงานวิจัยนี้จะเป็นการปรับปรุงผลิตภาพของสีย้อมผ้าประเภทสีอิงค์เจ็ตให้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรายละเอียดการดำเนินงานของขั้นตอนการนิยามปัญหามีดังนี้

3.1 ขั้นตอนการจัดตั้งทีมงาน

การดำเนินงานวิจัยนี้ต้องจัดตั้งทีมเพื่อระดมสมองในการแก้ไขปัญหา โดยการเลือกสมาชิกในทีมจะต้องเป็นผู้มีประสบการณ์และความชำนาญต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างดีเพื่อช่วยในการระดมสมองหาสาเหตุของปัญหา แนวทางการแก้ไขปัญหา และการทดลองในการแก้ไขปัญหาให้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสมาชิกในทีมในตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้

1. ผู้จัดการฝ่ายโรงงานสีสำเร็จรูป (Manager of Finishing Plant)
2. วิศวกรควบคุมกระบวนการผลิต (Process Engineer)
3. หัวหน้ากะเอ (Leader Shift A)
4. หัวหน้ากะบี (Leader Shift B)
5. หัวหน้ากะซี (Leader Shift C)
6. หัวหน้ากะดี (Leader Shift D)

นอกจากตำแหน่งที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังมีพนักงานที่ทำงานในแผนกต่าง ๆ และพนักงานบรรจุสีเข้าร่วมในทีมเพื่อให้การทดลองของงานวิจัยได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นโดยทีมงานและพนักงานทุกคนจะให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูล การหาปัญหา การแก้ไขปัญหา การจัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน ซึ่งผู้วิจัยได้จัดทำแผนงานเพื่อชี้แจงต่อทีมงานพนักงานและผู้เข้าร่วมงานวิจัยให้เข้าใจขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และวางแผนการประชุมทุกสัปดาห์เพื่อติดตามผลความคืบหน้าของการปรับปรุงกระบวนการผลิต

3.2 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการผลิต

โรงงานที่ผู้วิจัยเข้าไปศึกษากระบวนการผลิตสีดีดายมีกระบวนการผลิตย่อยทั้งหมด 2 กระบวนการดังนี้

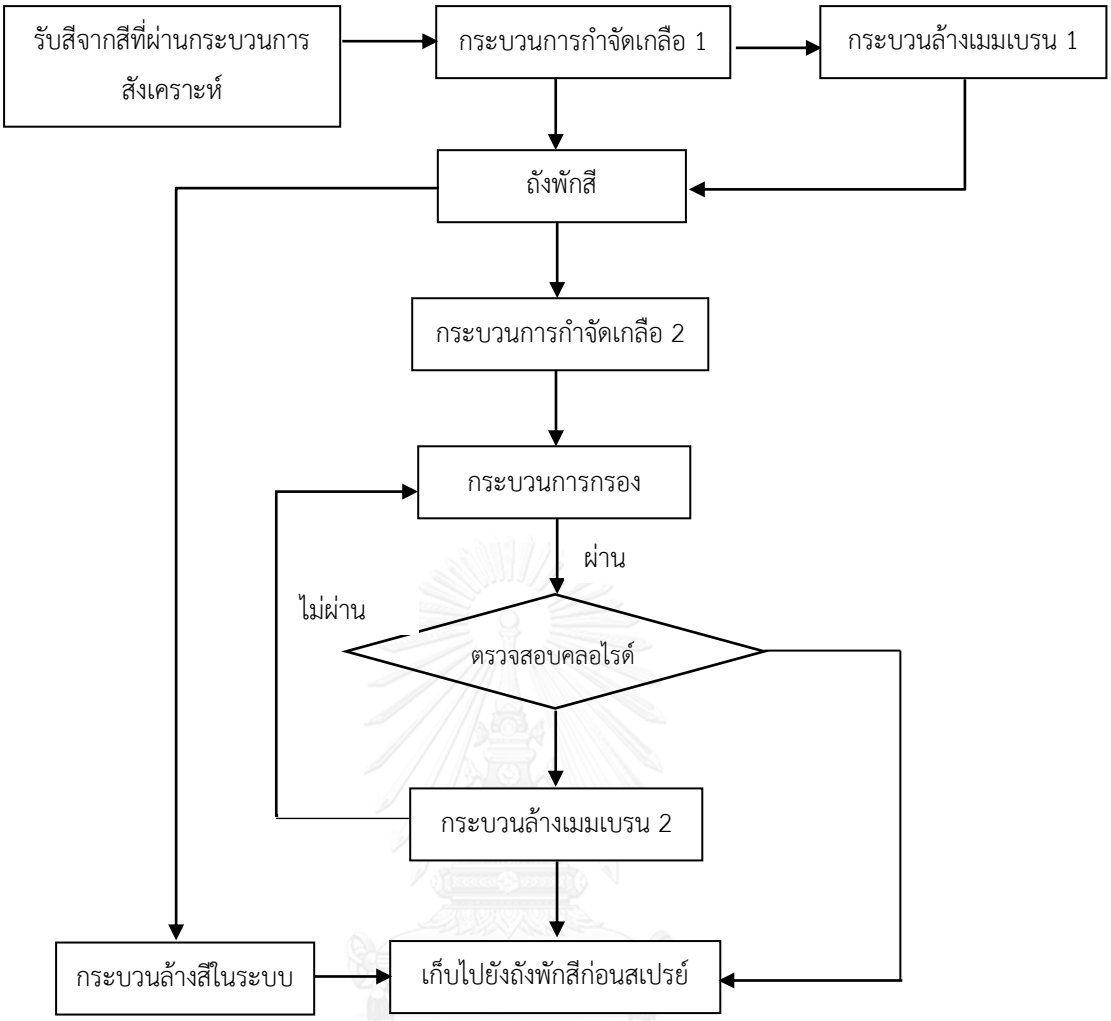
1. กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส
2. กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย

โดยสามารถแสดงรายละเอียดการไหลของกระบวนการได้ในแผนภาพการไหลกระบวนการ (Flow Process Chart) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดได้ในรูปที่ 3.1 ดังนี้

3.2.1 กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

ผังการไหลของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.1 แผนผังการไหลของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

จากรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงแผนผังการผลิตของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

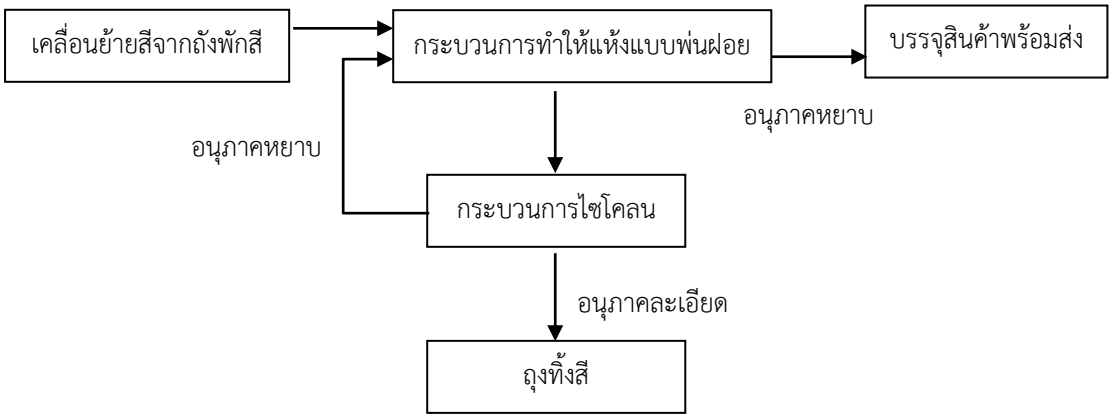
1. ขั้นแรกคือขั้นตอนที่ต้องรับสีสังเคราะห์ที่มาจากโรงงานสังเคราะห์สีเพื่อนำสีที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป
2. กระบวนการกำจัดเกลือ 1 เป็นขั้นตอนที่ดึงเกลือจำพวกคลอไรด์ออกจากสี โดยเติมน้ำอ่อนและเดินเครื่องจักรทำให้เมมเบรนทำการแยกเกลือและน้ำออกจากสีทำให้น้ำหนักของสีลดลงจนได้น้ำหนักค่าหนึ่งเรียกว่า จุดยุติ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการกำจัดเกลือ 2 ครั้ง และหลังจากที่ทำการกำจัดเกลือเสร็จแล้วจึงเคลื่อนย้ายสีที่ผ่านการกำจัดเกลือไปไว้ในถังพักสี

3. กระบวนล้างเมมเบรน 1 เป็นการใช้น้ำไล่สีที่อยู่ในเมมเบรนออกไปเพื่อลดการอุดตันสีในเมมเบรนสำหรับการกำจัดเกลือในครั้งต่อไป น้ำที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้จะถูกส่งไปรวมกับถังพักสีของข้อ 2
4. กระบวนการกำจัดเกลือ 2 ขั้นตอนนี้จะนำสีจากข้อ 3 มาใช้ในกระบวนการกำจัดเกลือโดยมีขั้นตอนเหมือนกับข้อ 2 แต่ใช้น้ำดีมินในการกำจัดเกลือ และหลังจากที่กำจัดเกลือเสร็จจะเติมลิเทียมคลอไรด์และทำการกำจัดเกลือต่อไป
5. กระบวนการกรอง หลังจากเสร็จจากกระบวนการกำจัดเกลือแล้วต้องมากรองสิ่งสกปรกออกจากสีเพื่อไม่ให้มีสิ่งสกปรกปนเปื้อนสี
6. การตรวจสอบคลอไรด์จะดำเนินการหลังจากกระบวนกรองโดยจะส่งสีไปตรวจในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจหาคลอไรด์ไม่ให้เกินข้อกำหนด ถ้าหากสีมีค่าคลอไรด์เกินข้อกำหนดต้องกลับไปทำข้อ 4 และ 5 แล้วส่งตรวจอีกครั้งจนกว่าจะได้ค่าคลอไรด์ไม่เกินข้อกำหนด
7. กระบวนล้างเมมเบรน 2 หลังจากที่ตรวจหาความเข้มข้นของคลอไรด์แล้วต้องใช้น้ำไล่สีที่อยู่ในเมมเบรนออกเพื่อไล่สีที่ค้างอยู่ออกจากเมมเบรนและน้ำที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้จะถูกส่งไปรวมกับถังพักสีรอสเปรย์ตามข้อ 6
8. กระบวนล้างสีในระบบ จากการกำจัดเกลือตามข้อ 2 และ 4 ทำให้มีสีหลงเหลืออยู่ภายในถังพักสีและภายในระบบจึงต้องใช้น้ำล้างสีในถังและล้างระบบเพื่อนำสีที่หลงเหลืออยู่ไปรวมกับสีที่อยู่ในถังรอสเปรย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.2 กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย

ผังการไหลของกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังการไหลของกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย

จากรูปที่ 3.2 เป็นการแสดงแผนผังการผลิตของกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยโดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสแล้วหลังจากนั้นเคลื่อนย้ายมายังถังพักสีเพื่อรอกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย
2. กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย เป็นขั้นตอนที่ป้อนของเหลวเข้าสู่หัวฉีดโดยอาศัยแรงดันแล้วพ่นของเหลวออกมาในลักษณะของละอองเล็ก ๆ และสัมผัสกับอากาศร้อนจากท่อนำเข้าที่ต่อกับแก๊สหุงต้มภายในแชมเบอร์ทำให้ของเหลวระเหยออกไปจนเหลือเพียงแค่สีในลักษณะที่เป็นผงและตกไปยังข้างล่างแชมเบอร์จะถูกลมจากข้างล่างแชมเบอร์เป่าที่เรียกว่าอากาศร้อน จะเป่าสีที่เป็นผงให้แห้งขึ้นและตกลงไปยังส่วนบรรจุภัณฑ์ ส่วนอากาศร้อนที่อยู่ในแชมเบอร์จะถูกนำออกโดยท่อนำออกและพัดพาเศษฝุ่นละอองที่อยู่ในแชมเบอร์ออกไปยังไซโคลนเพื่อดำเนินการกรองเศษฝุ่นละอองต่อไปซึ่งจะอธิบายในข้อ 2.2

กระบวนการไซโคลน หลังจากที่อากาศร้อนที่อยู่ในแชมเบอร์พัดพาเศษฝุ่นละอองและไหลออกไปยังท่อนำออกและเข้าสู่ไซโคลนจะทำให้เกิดลมพายุหมุนภายในไซโคลน เศษฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคหยาบจะถูกพัดไปตามแรงพายุหมุนจนถึงข้างล่างไซโคลนและกลับเข้าสู่แชมเบอร์เพื่อไปรวมกับผงสีภายในแชมเบอร์ ส่วนเศษฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคละเอียด จะหลุดออกจากแรงลมพายุหมุนและถูกพัดออกไปยังถุงกรองเพื่อกรองอากาศก่อนออกไปสู่สภาพแวดล้อม

3.3 การศึกษาสภาพของปัญหา

ในกระบวนการผลิตสีย้อมผ้าของโรงงานกรณีศึกษามีสีทั้งหมด 5 ประเภท ซึ่งได้แก่ เอดาย แอลดาย เอฟดาย นอนเอฟดาย และดีดาย ซึ่งแบ่งตามลักษณะหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสี จากนั้นผู้วิจัยและทีมงานจะทำการศึกษาสภาพปัญหาที่อยู่ในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเพื่อคัดเลือกประเภทสีที่ทำการปรับปรุงผลิตภาพ

3.3.1 การคัดเลือกประเภทของสี

จากกศึกษากระบวนการผลิตสีย้อมผ้า จึงเริ่มทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวข้องตั้งแต่ปี พ.ศ.2558 เพื่อคัดเลือกประเภทของสีและระบุสภาพปัญหาของงานวิจัย แล้วจึงทำการคำนวณหาผลิตภาพของสีแต่ละประเภทซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 1.1 และคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลผลิตภาพแต่ละสีในปี พ.ศ.2558

ประเภทสี	วัตถุดิบป้อนเข้า	ผลผลิต	ผลิตภาพ (เปอร์เซ็นต์)
ดีดาย	122,066	24,376.58	19.97
นอนเอฟดาย	317,514	100,937.71	31.79
เอฟดาย	1,628,879	801,897.13	49.23
เอดาย	734,805	223,160.28	30.37
แอลดาย	168,793	57,170.19	33.87

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1.1 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมตั้งแต่ปี พ.ศ.2558 พบว่าสีประเภทดีดายมีค่าผลิตภาพต่ำที่สุดซึ่งเท่ากับ 19.97 เปอรเซ็นต์ ทำให้บริษัทใช้เวลาในการผลิตสีมาก ส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตสูงเนื่องจากต้นทุนของการผลิตสีทุกประเภทแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการผลิต

ต้นทุนการผลิตสีต่อชั่วโมงคิดเป็นเงินมูลค่า 14,648 บาทต่อชั่วโมง สีดีดายมีจำนวนการผลิตเป็น 82 รอบการผลิต ซึ่งจะเห็นได้ว่าสีดีดายมีจำนวนรอบการผลิตในการผลิตน้อย แต่ใช้ระยะเวลาในการผลิตสีนานกว่าสีชนิดอื่น ทำให้ไม่สามารถผลิตสีให้ทันต่อความต้องการลูกค้าและยังทำให้ตารางการผลิตสีประเภทอื่น ๆ คลาดเคลื่อนออกไปอีกด้วย ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสีเพิ่มมากขึ้นคิดเป็นเงิน 38,145,354 บาทต่อปี ดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 1.2

ตารางที่ 3.2 ค่าใช้จ่ายในการผลิตสีแต่ละชนิด

ประเภทสี	จำนวนรอบการผลิต	ชั่วโมงในการผลิตทั้งหมด	ต้นทุนการผลิต (บาท)
ดีดาย	82	2,604.07	38,145,354
นอนเอฟดาย	91	272.15	3,986,615
เอฟดาย	741	2,221.20	32,536,858
เอดาย	294	881.77	12,916,402
แอลดาย	77	306.90	4,495,520

จากการวิเคราะห์สภาพปัญหาและความสำคัญของปัญหาเพื่อพิจารณาในการปรับปรุงกระบวนการผลิตสีย้อมผ้า พบว่าสีประเภทดีดายควรได้รับการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากว่ามีผลิตภาพน้อยที่สุดคือ 19.97 เปอร์เซ็นต์ และมีต้นทุนการผลิตสีมากที่สุด คือ 38,145,354 บาท ทำให้ผู้วิจัยเลือกสีประเภทดีดายเพื่อทำการศึกษาสภาพสภาพปัญหาและสาเหตุต่อไป ภายในอนาคตทางโรงงานคาดว่าความต้องการของสีประเภทดีดายจะมีมากขึ้นทุก ๆ ปี ดังนั้น จึงต้องเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทดีดายเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการลูกค้าที่เกิดขึ้นภายในอนาคตได้ทันที

3.4 วัตถุประสงค์ของโครงการปรับปรุงคุณภาพ

เพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีย้อมผ้าประเภทดีดายให้เพิ่มขึ้นจากเดิม 50 เปอร์เซ็นต์ จากค่าผลิตภาพปัจจุบัน 19.97 เปอร์เซ็นต์หรือให้ผลิตภาพเพิ่มขึ้น 29.96 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5 ขอบเขตของปัจจัย

1. ศึกษาเพื่อเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทสีดีดายเท่านั้น
2. ศึกษากระบวนการผลิตของสีได้แก่ กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเท่านั้น ซึ่งไม่รวมขั้นตอนการปรับปรุงขั้นตอนการสังเคราะห์สีและขั้นตอนการบรรจุภัณฑ์
3. ศึกษาขนาดอนุภาคของสี 50 – 100 ไมครอน เท่านั้น

3.6 กำหนดความสำคัญทางธุรกิจ (Business Case)

ผลิตภาพของสีประเภทดีดายมีค่าต่ำ จึงส่งผลกระทบให้มีรอบการผลิตที่ยาวนานทำให้ไม่สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการของลูกค้าได้ทัน และนอกจากนี้ยังส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นเนื่องจากมีรอบการผลิตที่ยาวนาน

3.7 คำอธิบายสภาพปัญหา (Problem Statement)

ในกระบวนการผลิตสีประเภทดีดาย พบว่ามีค่าผลิตภาพเฉลี่ยเท่ากับ 19.97% ส่งผลให้มีรอบการผลิตสีที่ยาวนานส่งผลให้ผลิตไม่ทันกับความต้องการของลูกค้า และคิดเป็นมูลค่าการผลิตทั้งสิ้น 38,145,354 บาท

3.8 ตัวชี้วัดในการทำโครงการ (Project Metrics)

- ตัวชี้วัดทางธุรกิจ (Business Metric): ต้นทุนการผลิตสี
- ตัวชี้วัดหลัก (Primary Metric): ผลิตภาพของสีดีดาย
- ตัวชี้วัดรอง (Secondary Metric): รอบเวลาการผลิต
- ตัวชี้วัดสืบเนื่อง (Consequential Metric): ค่าไฟ
- ตัวชี้วัดทางการเงิน (Financial Metric): ต้นทุนการผลิตสี

3.9 ข้อจำกัดของโครงการ (Project Constraints)

สมาชิกในทีมมีเวลาให้โครงการ 5 ชั่วโมงต่อ สัปดาห์

3.10 สมมติฐานของโครงการ (Project Assumptions)

1) สมาชิกในทีมทุกคนให้ความร่วมมือในการปรับปรุงตามเวลาที่กำหนด
2) สมาชิกทุกคนต้องเข้าประชุมอย่างน้อย 1 ครั้งต่อสัปดาห์เพื่อรายงานความคืบหน้า
3) การดำเนินงานของโครงการได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารระดับสูง

Chulalongkorn University

3.11 สรุปผลขั้นตอนการนิยามปัญหา

ในขั้นตอนการนิยามปัญหานี้เป็นขั้นตอนที่ระบุสภาพปัญหา ขอบเขต วัตถุประสงค์ เงื่อนไข และสมมติฐานของโครงการปรับปรุงคุณภาพ รวมทั้งกำหนดทีมงานปรับปรุงคุณภาพ และผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการผลิตสีย้อมผ้าซึ่งสีย้อมผ้าที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 5 ประเภท คือ ดีดาย นอนเอฟดาย เอดาย เอฟดาย และแอลดาย จากนั้นจึงทำการศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานกรณีศึกษาปี พ.ศ. 2558 พบว่า สีดีดายมีค่าผลิตภาพน้อยที่สุดเท่ากับ 19.97 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นต้นทุนการผลิตทั้งสิ้น 38,145,354 บาท ในขณะที่สีประเภทอื่น ๆ มีค่าผลิตภาพมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์และคิดเป็นต้นทุนการผลิตน้อยกว่าสีดีดาย และภายในอนาคตสีดีดายมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มขึ้นทุกปี ถ้าหากไม่ได้รับการปรับปรุงกระบวนการแล้วจะส่งผลทำให้ส่งมอบสินค้าไม่ทันต่อความต้องการลูกค้าและยังทำให้มีระยะเวลาการผลิตที่นาน ส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตสีมากขึ้น

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัญหาเฉพาะกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย และมีเป้าหมายให้ผลิตภาพเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นบทสรุปผู้บริหาร (Project Charter) ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Project Charter

Project Title: Productivity Improvement in Spray Dry Process in Textile Dye Manufacturing

Business Case:

ผลิตภาพ (Productivity) ของสีประเภทดีดาย (D-dye) มีค่าต่ำ จึงส่งผลกระทบให้มีรอบการผลิตที่ยาวนานทำให้ไม่สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการของลูกค้าได้ทัน และนอกจากนี้ยังส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นเนื่องจากมีรอบการผลิตที่ยาวนาน

Problem Statement:

ในกระบวนการผลิตสีประเภทดีดาย พบว่ามีค่าผลิตภาพเท่ากับ 19.97% ส่งผลให้มีรอบการผลิตสีที่ยาวนานส่งผลให้ผลิตไม่ทันกับความต้องการของลูกค้า และคิดเป็นมูลค่าการผลิตทั้งสิ้น 38,145,354 บาท

Objective Statement:

ปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มผลิตภาพ 50% ภายในเดือนธันวาคม 2559

Project Metrics:

- Business Metric: ต้นทุนการผลิตสี
- Primary Metric: ผลิตภาพของสีดีดาย
- Secondary Metric: รอบเวลาการผลิต
- Consequential Metric: ค่าไฟ
- Financial Metric: ต้นทุนการผลิตสี

Project Scope:

- ศึกษาเฉพาะสีประเภทดีดาย
- ศึกษาเครื่องจักร Spray Dry TO1
- ศึกษากระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส
- ศึกษาสีขนาดอนุภาค 50 – 100 ไมครอน

Project Constraint:

สมาชิกในทีมมีเวลาให้โครงการ 5 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

Project Assumption:

1. สมาชิกในทีมทุกคนให้ความร่วมมือในการปรับปรุงตามเวลาที่กำหนด
2. สมาชิกทุกคนต้องเข้าประชุมอย่างน้อย 1 ครั้งต่อสัปดาห์เพื่อรายงานความคืบหน้า
3. การดำเนินงานของโครงการได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารระดับสูง

Team Members:

1. Apaporn C. (Project Leader)
2. Weena J. (Production Finishing Manager)
3. Tharmmanoon I. (Process Engineer)
4. Noppol R. (Leader Shift A)
5. Isra K. (Leader Shift B)
6. Montian J. (Leader Shift C)
7. Wichan T. (Leader Shift D)

Project Timeline:

ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการโครงการ
ตั้งแต่ 5 ตุลาคม 2558 ถึง 31 มีนาคม 2560

กิจกรรม	เริ่มต้น	สิ้นสุด
Define	5 ต.ค.58	20 ต.ค.58
Measure	21 ต.ค.58	6 พ.ย.58
Analysis	9 พ.ย.58	21 พ.ย.58
Improve	1 ต.ค.59	1 ธ.ค.59
Control	6 ม.ค.60	31 มี.ค.60

บทที่ 4
ขั้นตอนการวัดและกำหนดสาเหตุของปัญหา

หลังจากที่ได้หัวข้อปัญหาจากขั้นตอนการนิยามปัญหาแล้วจึงวิเคราะห์ความแม่น (Accuracy)และความเที่ยง (Precision) ของระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA) เพื่อวัดค่าผลิตภาพของสีย้อมผ้าแล้วจึงทำการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable, KPIV) ของปัญหาที่เกิดขึ้นกับสมาชิกภายในทีมด้วยเครื่องมือแผนผังแสดงความสัมพันธ์และหาสาเหตุและผล เมื่อได้ปัจจัยจากการกรองด้วยเครื่องมือแล้วจึงทำการให้คะแนนความสำคัญของปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบมากด้วยตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

4.1 การวิเคราะห์ความเที่ยงและความแม่นของระบบการวัด

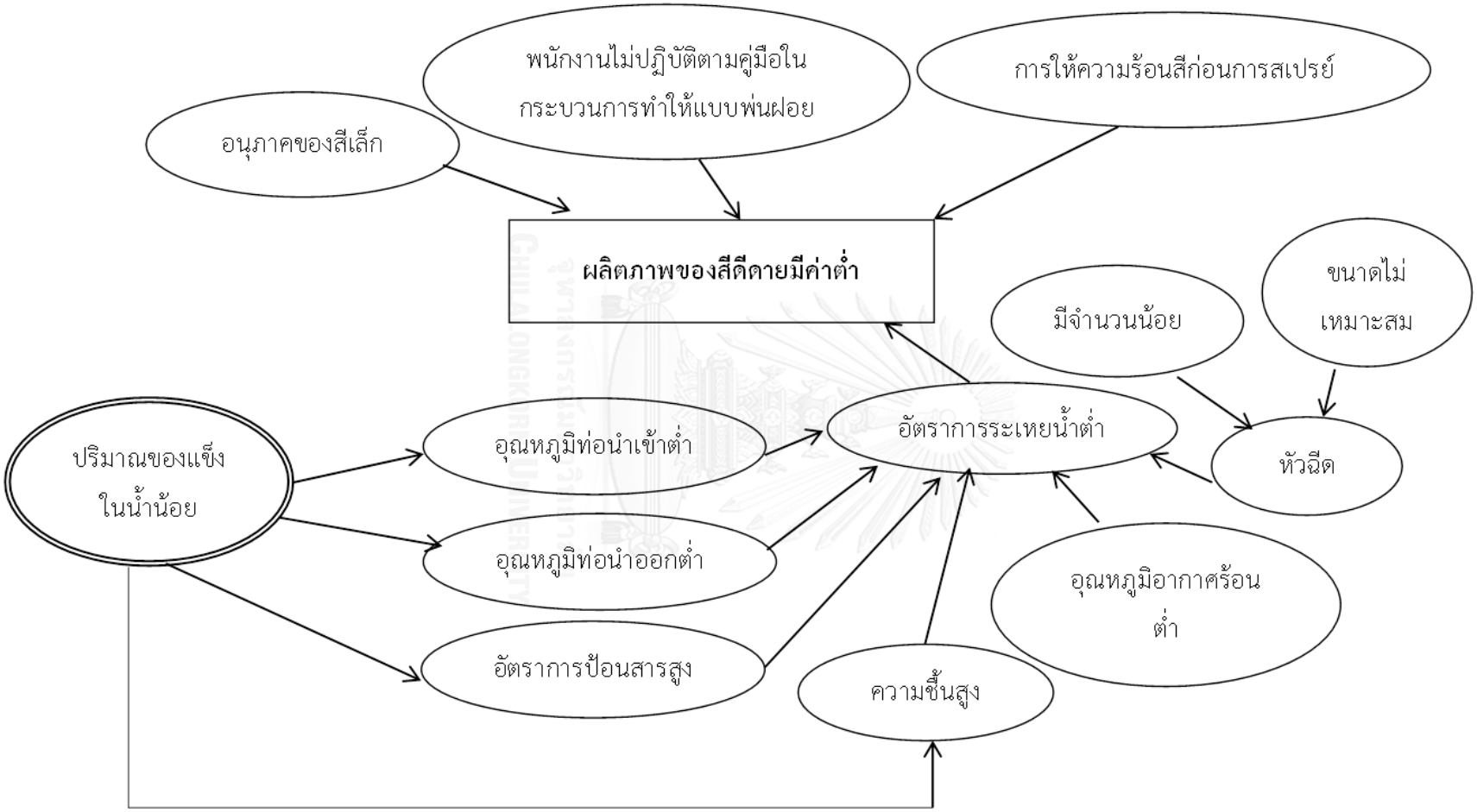
ในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยจะใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการตั้งค่าเครื่องจักรและมีเซนเซอร์คอยตรวจวัดปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ อุณภูมิตามจุดต่าง ๆ รวมทั้งค่าผลิตภาพ เป็นต้น ทำให้ในแต่ละกระบวนการไม่มีพนักงานคอยทำการวัด ดังนั้นผลของการวัดจึงขึ้นอยู่กับเซนเซอร์ ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษาได้ทำการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration) ทุก ๆ ปี ทำให้เครื่องมือวัดที่ใช้อยู่ในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยมีความแม่นและความเที่ยงซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้ (Reliability) เมื่อได้วิเคราะห์แข้วว่า ระบบการวัดมีความเชื่อถือได้จึงทำการระดมสมองกับสมาชิกในทีมเพื่อระบุสาเหตุที่ทำให้ผลิตภาพต่ำทั้งในกระบวนรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยต่อไป

4.2 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable, KPIV)

ในการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อการทดลองภายในสมาชิกในทีม โดยสามารถแบ่งหมวดหมู่ของปัจจัยได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

1. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับพนักงาน (Man)
2. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ (Method)
4. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ (Material)

ผู้วิจัยและทีมงานค้นหาสาเหตุที่ทำให้ผลิตภาพของสีดีดายต่ำในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้แผนผังสาเหตุแสดงความสัมพันธ์ (Relation Diagram) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่อาจส่งผลต่อผลิตภาพของสีดีดาย

จากรูปที่ 4.1 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภาพของสีดีดายต่ำซึ่งมีผลต่อผงสีหรือผลิตภัณฑ์น้อยสามารถอธิบายสาเหตุแต่ละปัจจัยภายในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยได้ดังนี้

1. เครื่องจักร ปัญหาผลิตภาพต่ำในส่วนของเครื่องจักรมีสาเหตุจากอัตราการระเหยน้ำต่ำ กล่าวคือสีที่เป็นของเหลวเมื่อสัมผัสกับอากาศที่ร้อนทำให้น้ำที่เป็นส่วนประกอบของสีระเหยไปและได้เป็นผงสี ถ้าหากมีอัตราการระเหยน้ำสูงจะทำให้ของเหลวระเหยกลายเป็นสีอย่างรวดเร็วและกลายเป็นผงสีเกือบหมด แต่หากมีอัตราการระเหยน้ำต่ำส่งผลให้ของเหลวระเหยกลายเป็นผงสีน้อยกว่า สิ่งที่เป็นปัจจัยที่ทำให้มีอัตราการระเหยน้ำต่ำคือ อุณหภูมิท่อนำเข้าต่ำ อุณหภูมิท่อนำออกต่ำ อัตราการป้อนสารสูง ความชื้นสูง จำนวนหัวฉีดและขนาดหัวฉีด ปัจจัยทั้งหมดนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยทำให้มีความชื้นสูงส่งผลให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิท่อนำเข้าและอุณหภูมิท่อนำออกได้ เนื่องจากว่าของเหลวนี้มีปริมาณน้ำมากและมีเนื้อสีน้อยทำให้อัตราการระเหยน้ำต่ำและทางโรงงานกรณีศึกษาได้เพิ่มอุณหภูมิของทั้งท่อนำเข้าและท่อนำออกสูงทำให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้อีก ส่วนอัตราการป้อนสารสูง และความชื้นสูงเนื่องจากว่าเครื่องจักรทางโรงงานกรณีศึกษาเป็นเครื่องจักรอัตโนมัติเมื่อเพิ่มอุณหภูมิท่อนำเข้าและท่อนำออก ทำให้เครื่องจักรต้องเพิ่มเพิ่มการป้อนสาร ในการศึกษาสภาพปัญหาของปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยจะต้องทำการศึกษาในกระบวนการีเวิร์สออสโมซิสต่อไป ส่วนการเพิ่มขนาดหัวฉีดและจำนวนฉีดคาดว่าจะทำให้มีผงสีมากขึ้นเนื่องจากว่าการเพิ่มขนาดหัวฉีดจะทำให้การพ่นสีมีลักษณะกระจายตัวมากขึ้นทำให้สามารถระเหยน้ำได้ง่าย ส่วนการเพิ่มจำนวนหัวฉีดให้มากจะช่วยเพิ่มปริมาณสีที่สเปรย์ออกมามากขึ้นทำให้ผลิตภาพเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิอากาศร้อนต่ำซึ่งอากาศร้อนจะอยู่ข้างใต้แชมเบอร์ในส่วนของฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed) ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิอากาศร้อนต่ำส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำในสีได้ไม่ดีทำให้สีที่ถูกสเปรย์ออกมาเป็นผงสีได้ยากทำให้ผลิตภาพสีดีดายต่ำ

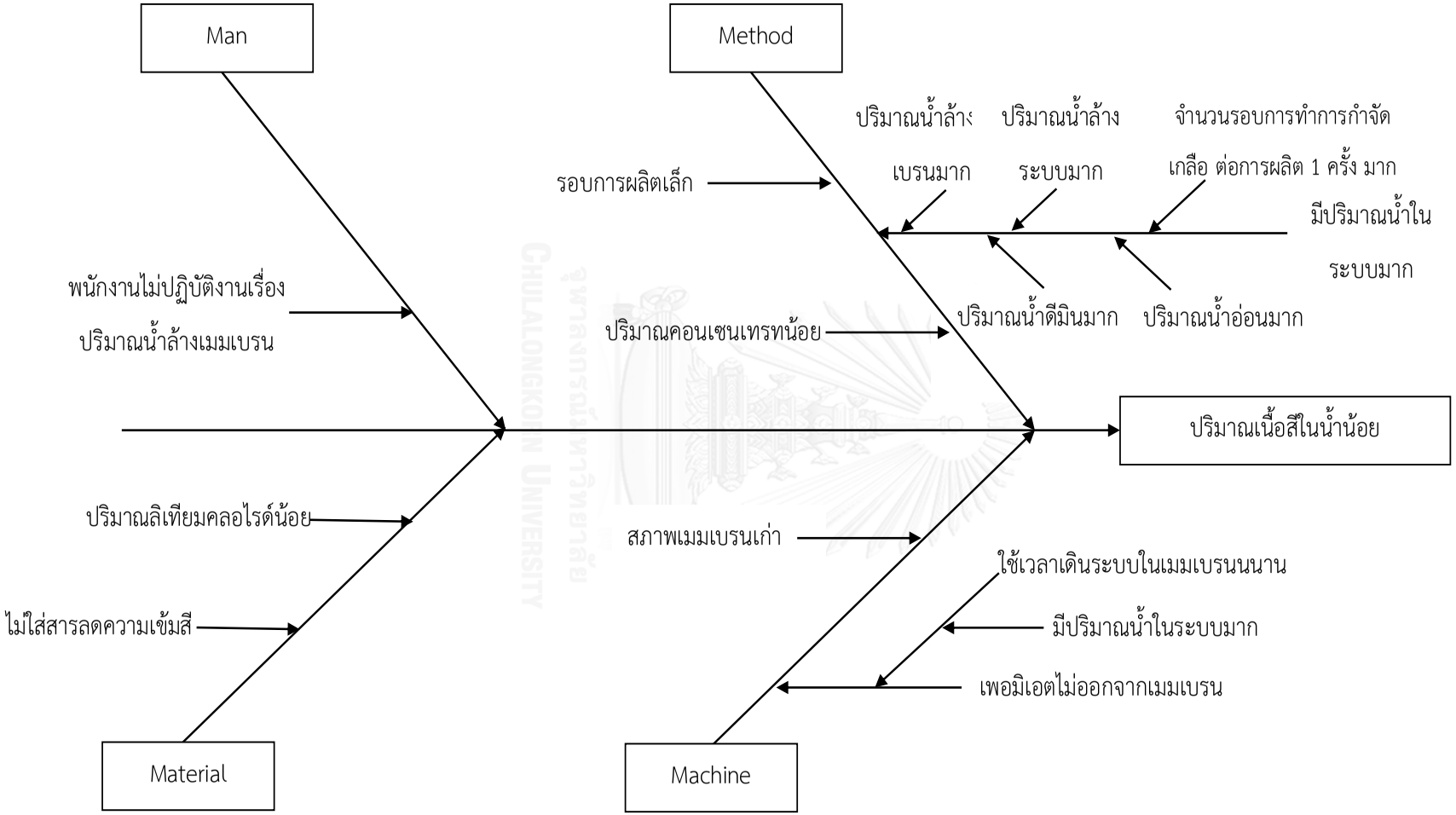
2. วิธีการ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการที่ทำให้ผลิตภาพต่ำคือ ถ้าหากให้ความร้อนสีก่อนจะเริ่มกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้สามารถช่วยการระเหยน้ำในสีได้ง่ายขึ้นจึงเกิดเป็นผงสีได้

3. วัตถุดิบ สีประเภทดีดายมีอนุภาคสีเล็กเป็นเรื่องทางโครงสร้างทางเคมีของสีประเภทดีดายไม่สามารถปรับขนาดได้เนื่องจากเป็นข้อกำหนดของสีที่มีต่อคุณภาพของสี

4. พนักงาน ในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยถึงแม้ว่าจะมีคู่มือปฏิบัติตามเพื่อให้พนักงานปฏิบัติตามมาตรฐานทำให้เกิดกระบวนการคงที่ แต่ก็มีพนักงานบางคนที่ไม่ปฏิบัติตามคู่มือจึงทำส่งผลกระทบต่อผลิตภาพของสี

จากรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณเนื้อสีในน้ำเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อหลายปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิท่อนำเข้า อุณหภูมิท่อนำออก อัตราการป้อนสาร และความชื้น จึงทำการหาสาเหตุที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย ผู้วิจัยและทีมจึงได้ทำการศึกษากระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสเพื่อหาสาเหตุที่คาดว่าจะมีผลต่อปริมาณเนื้อสีในน้ำซึ่งสามารถแสดงสาเหตุของปัญหาดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect) ได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.2 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย

จากรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นแผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย ส่งผลให้มีผลิตภาพของสีประเภทดีดายต่ำสามารถอธิบายสาเหตุภายในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสได้ดังนี้

1. เครื่องจักร เนื่องจากว่าในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสยิ่งใช้เวลานานในการเดินระบบแล้วจะทำให้ตัวทำละลายหรือเพอมิเอทไม่ออกจากเมมเบรนส่งผลให้มีน้ำในระบบมากขึ้นทำให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย นอกจากนี้ปัญหาเมมเบรนมีอายุการใช้งานนานทำให้การตั้งค่าในปัจจุบันอาจจะไม่มีเหมาะสมกับเมมเบรนที่มีอายุการใช้งานนานทำให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย

2. วิธีการ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยเนื่องจากว่าในการล้างเมมเบรนต้องใช้น้ำไล่สีที่อุดตันในเมมเบรนออกและนำน้ำที่เกิดจากการไล่สีที่มีสีไปรวมกับสีที่ผ่านการกำจัดเกลือยิ่งใช้น้ำมากเท่าไรปริมาณเนื้อสีในน้ำจะยิ่งน้อยลง การกำหนดปริมาณคอนเซนเทรทเป็นสาเหตุหนึ่งที่คาดว่าจะมีผลเพราะว่าการกำหนดปริมาณคอนเซนเทรทของสีในขั้นตอนการกำจัดเกลือซึ่งจะวัดเป็นน้ำหนักในหน่วยกิโลกรัมถ้าหากกำหนดปริมาณคอนเซนเทรทน้อยจะกำจัดตัวทำละลายในสีได้มากขึ้นทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำมีมากขึ้น ส่วนปริมาณน้ำและจำนวนครั้งที่เกิดจากการกำจัดเกลือใน 1 รอบการผลิต มีผลเนื่องจากว่าปริมาณน้ำดีมินและน้ำอ่อนที่ใช้ในการกำจัดเกลืออาจมีปริมาณที่มากเกินไปทำให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย และจำนวนรอบการกำจัดเกลืออาจมากเกินไปทำให้มีน้ำในระบบมาก แต่ทั้ง 3 ปัจจัยจะไม่ทำการทดลองเนื่องจากว่าทั้ง 3 ปัจจัยนี้แผนกการควบคุมคุณภาพ (Quality Control) ของบริษัทกำลังศึกษาปรับปริมาณน้ำและจำนวนครั้งให้เหมาะสมต่อสี และรอบการผลิตที่เล็กที่ทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยเนื่องจากว่าการใช้น้ำไล่สียังคงใช้เท่ากับรอบการผลิตที่มากจึงทำให้มีปริมาณน้ำในการล้างเมมเบรนมากทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย

3. วัตถุดิบ โดยทั่วไปสีประเภทอื่น ๆ จะมีการใส่สารลดความเข้มของสีทำให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำมากขึ้น แต่สีประเภทดีดายไม่ได้ใส่สารลดความเข้มของสีจึงทำให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยกว่าประเภทอื่น ๆ เพราะสีดีดายเป็นสีที่มีความบริสุทธิ์มากถ้าหากใส่สารลดความเข้มของสีอาจจะทำให้มีสิ่งสกปรกมากทำให้มีคุณภาพของสีลดลง และการเติมลิเทียมคลอไรด์ในขั้นตอนการกำจัดเกลือ 2 ถ้าหากเพิ่มลิเทียมคลอไรด์ให้มากขึ้นจะช่วยไปจับกับคลอไรด์ที่อยู่ในสีทำให้คลอไรด์ผ่านเมมเบรนออกไปง่ายขึ้น

4 พนักงาน มีพนักงานบางคนไม่ปฏิบัติตามคู่มือในเรื่องการใช้ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ซึ่งใช้ปริมาณน้ำล้างเมมเบรนมากเกินไปทำให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยลงจึงต้องจัดการอบรมพนักงานใน

เรื่องปริมาณน้ำล้างเมมเบรนที่ส่งผลกระทบต่อสี และไม่มีคู่ปฏิบัติงานในเรื่องปริมาณน้ำล้างระบบ โดยพนักงานปฏิบัติงานโดยใช้สายตาเปล่ามองน้ำที่ไหลออกจากระบบจนกว่าน้ำที่ออกจากถังจะใส ซึ่งสายตาการมองของพนักงานแต่ละคนไม่เหมือนกันทำให้พนักงานบางคนใช้น้ำมากเกินไปและน้ำที่ใช้ล้างระบบจะไปรวมกับสีที่พร้อมการสเปรย์ทำให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อย

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ได้อธิบายปัจจัยที่เป็นไปได้จากที่ส่งผลให้ผลิตภาพต่ำจากแผนผังแสดงความสัมพันธ์และแผนผังสาเหตุและผลของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยจึงได้ทำการระดมสมองเพื่อจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุของปัญหาซึ่งมีเกณฑ์ให้คะแนนดังตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นเกณฑ์คะแนนที่เหมาะกับการแยกปัจจัยที่มีผลกระทบมากและน้อยออกจากกันอย่างชัดเจน [38, 39] ดังตารางที่ 4.1 และลงคะแนนในแต่ละกะดังตารางที่ 4.2 โดยในตัวแทนแต่ละกะจะทำการระดมสมองเพื่อให้คะแนนตามระดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย หลังจากนั้นจึงพล็อตกราฟพาเรโตดังรูปที่ 4.3 เพื่อเลือกปัญหาที่คาดว่ามีผลกระทบมากนำมาศึกษาต่อซึ่งสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

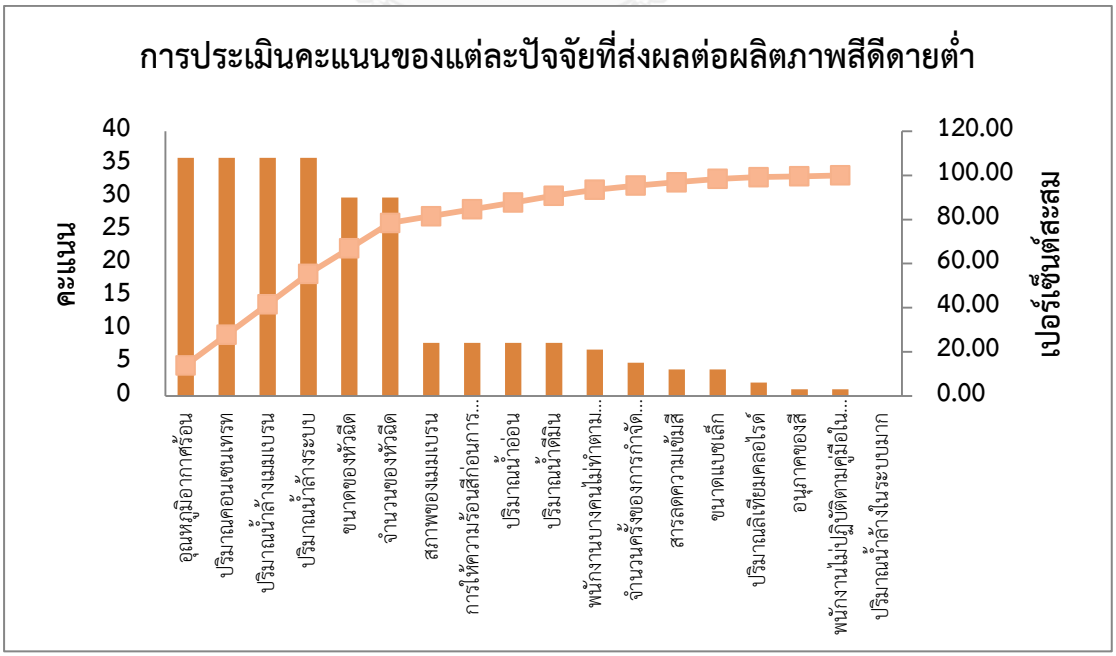
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

ระดับความสำคัญ	ความสัมพันธ์จากสาเหตุและผล	คะแนน
มาก	ปัจจัยมีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปรตอบสนอง	9
ปานกลาง	ปัจจัยมีความสัมพันธ์ปานกลางกับตัวแปรตอบสนอง	3
น้อย	ปัจจัยมีความสัมพันธ์น้อยกับตัวแปรตอบสนอง	1
ไม่มี	ปัจจัยไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนอง	0

ตารางที่ 4.2 การประเมินคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภาพสีดีดายต่ำ

ที่	ปัจจัยนำเข้า	กะ A	กะ B	กะ C	กะ D	รวม
		คะแนน	คะแนน	คะแนน	คะแนน	
1	พนักงานไม่ปฏิบัติตามคู่มือในกระบวนการทำให้แบบพ่นฝอย	0	1	0	0	1
2	จำนวนของหัวฉีด	9	9	9	3	30
3	ขนาดของหัวฉีด	9	3	9	9	30
4	อุณหภูมิอากาศร้อน	9	9	9	9	36

5	การให้ความร้อนสีก่อนการสเปรย์	3	3	1	1	8
6	อนุภาคของสี	0	0	1	0	1
7	ปริมาณน้ำล้างระบบ	9	9	9	9	36
8	พนักงานบางคนไม่ทำตามคู่มือในการใช้น้ำล้างเมมเบรน	1	3	3	0	7
9	สภาพของเมมเบรน	3	1	1	3	8
10	รอบการผลิตเล็ก	1	1	1	1	4
11	ปริมาณคอนเซนเทรท	9	9	9	9	36
12	ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน	9	9	9	9	36
13	จำนวนครั้งของการกำจัดเกลือใน 1 รอบการผลิต	1	3	0	1	5
14	ปริมาณน้ำอ่อน	1	3	3	1	8
15	ปริมาณน้ำดีมิน	3	3	1	1	8
16	ปริมาณลิเทียมคลอไรด์	0	1	1	0	2
17	สารลดความเข้มสี	1	1	1	1	4
18	มีปริมาณน้ำในระบบมาก	0	0	0	0	0



รูปที่ 4.3 กราฟพาเรโตของการประเมินคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภาพสีดีดายต่ำ

จากรูปที่ 4.3 พบว่า 6 ปัจจัยแรกที่มีคะแนนสูงกว่าปัจจัยอื่น ๆ อย่างชัดเจนคือ อุณหภูมิอากาศร้อน ปริมาณคอนเซนเทรต ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ ขนาดของหัวฉีด และจำนวนหัวฉีด ทางผู้วิจัยและทีมได้ระดมความคิดเห็นกันเพื่อหาข้อจำกัดแต่ละปัจจัยนำเข้าดังนี้ ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาของผลิตภาพสีดีดายต่ำ

ปัญหา	ปัจจัย	ศึกษา	ไม่ศึกษา	เหตุผล
ผลิตภาพสีดีดายต่ำ	อุณหภูมิอากาศร้อน	✓		จากการให้คะแนนของทีมซึ่งคิดว่า อาจมีผลกระทบมาก
	ปริมาณคอนเซนเทรท	✓		
	ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน	✓		
	ปริมาณน้ำล้างระบบ	✓		
	จำนวนของหัวฉีด	✓		
	ขนาดของหัวฉีด	✓		
	การให้ความร้อนสีก่อนการสเปรย์		✓	สูญเสียเวลาที่รอก่อนการสเปรย์
	พนักงานไม่ปฏิบัติตามคู่มือในกระบวนการทำให้แบบพ่นฝอย		✓	ทางบริษัทจะดำเนินการฝึกอบรมพนักงานภายหลัง
	สภาพของเมมเบรน		✓	ยังไม่ถึงเวลาเปลี่ยนเมมเบรน
	อนุภาคของสี		✓	เป็นลักษณะทางเคมีของสีประเภทดีดายซึ่งทางโรงงานได้กำหนดขนาดที่อยู่ในช่วง 50 – 100 ไมครอน ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีผลกระทบตัวชี้วัดทางด้านคุณภาพ เช่น ความชื้น ขนาดอนุภาคสี ความหนาแน่นรวม และความเข้มสี
	พนักงานไม่ปฏิบัติตาม		✓	ทางบริษัทจะดำเนินการ

	คู่มือในการใช้น้ำล้างเมมเบรน			ฝึกอบรมพนักงานภายหลัง
	รอบการผลิตเล็ก		✓	ไม่สามารถควบคุมรอบการผลิตได้
	จำนวนครั้งของการกำจัดเกลือใน 1 รอบการผลิต		✓	แผนกควบคุมคุณภาพของบริษัทกำลังดำเนินการปรับปรุงขั้นตอนการกำจัดเกลือ
	ปริมาณน้ำอ่อน		✓	
	ปริมาณน้ำดีมิน		✓	
	ปริมาณลิเทียมคลอไรด์		✓	จากการให้คะแนนของทีมซึ่งคาดว่า อาจมีผลกระทบน้อย
	สารลดความเข้มสี		✓	อาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของสี
	ปริมาณน้ำล้างระบบมาก		✓	เนื่องจากว่าระยะเวลาในการเดินระบบของกระบวนรีเวิร์สออสโมซิสนาน ทำให้น้ำในการกำจัดเกลือค้างอยู่ในระบบมากซึ่งไม่สามารถควบคุมระยะเวลาในระบบได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการระบุปัญหาโดยการระดมสมองจากทีม ผู้วิจัยและทีมได้เห็นถึงปัจจัยนำเข้าบางปัจจัยอาจส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของสี ซึ่งทางโรงงานได้มีการกำหนดสเปคสีที่ส่งมอบลูกค้าอยู่ที่ขนาด 50 – 100 ไมครอน แต่ในการวัดขนาดอนุภาคเพื่อง่ายและรวดเร็วต่อการวัดทางโรงงานจะวัดเป็นค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) โดยวัดจากหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งกำหนดสเปคอยู่ช่วง 0.4 – 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หมายความว่า ในปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีวัสดุอยู่ได้ 0.4 – 0.6 กรัม ถ้าหากสีมีค่าความหนาแน่นจำเพาะอยู่มากกว่า 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจะทำให้สีมีขนาดอนุภาคเล็กมากส่งผลให้สีฟุ้งกระจาย แต่ถ้าหากสีมีค่าความหนาแน่นจำเพาะน้อยกว่า 0.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจะทำให้สีมีขนาดอนุภาคใหญ่ส่งผลให้บรรจุสีลงในกล่องไม่หมด จากที่ได้ทำการเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาข้างต้นแล้ว ผู้วิจัยจึงจะได้ศึกษาขนาดหัวฉีดและความดันที่ทำให้ขนาดของอนุภาคของสีตามต้องการโดยทราบความสัมพันธ์ว่าหากหัวฉีดที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดความดันสูงที่หัวฉีดแต่ไม่ถึงขีดจำกัดของความดันที่กำหนดไว้จะทำให้สีมีขนาดอนุภาคเล็กส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นรวมสูง หากหัวฉีดมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดความดันที่หัวฉีดต่ำ

ทำให้สีมีขนาดอนุภาคใหญ่ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมต่ำ โดยงานวิจัยนี้มีขอบเขตว่าจะไม่ปรับขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่ออกจากกระบวนการผลิต

จากปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่ได้เลือกจากกราฟพาเรโตพบว่ามีปัจจัยที่มีผลกระทบมากได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อน จำนวนหัวฉีด ขนาดหัวฉีด ปริมาณคอนเซนเทรท น้ำล้างเมมเบรน น้ำล้างระบบ มีบางปัจจัยที่มีข้อจำกัดและไม่มีข้อจำกัดทางการศึกษาส่งผลให้มีบางปัจจัยไม่สามารถที่จะทำการศึกษาการทดลองต่อได้ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ

ที่	ปัจจัย	ศึกษา	ไม่ศึกษา	เหตุผล
1	อุณหภูมิอากาศร้อน	✓		หากเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนให้มากขึ้นจะทำให้มีอัตราการระเหยน้ำที่มากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภาพมากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนที่มากเกินไปจะทำให้ผงสีไหม้ และไม่มีสูตรการคำนวณของการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจึงต้องทำการทดลอง
2	จำนวนหัวฉีดและขนาดหัวฉีด	✓		การเพิ่มขนาดหัวฉีดและจำนวนหัวฉีดทำให้ผลิตภาพเพิ่มขึ้น แต่ที่ทำการศึกษาจำนวนหัวฉีดและขนาดหัวฉีดร่วมกันเพราะว่าขนาดหัวฉีดบางขนาดไม่สามารถเพิ่มจำนวนหัวฉีดได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องจักรที่มีความดันของหัวฉีดไม่พอ เช่น ขนาดหัวฉีด 2.5 และ 2.75 มิลลิเมตร ส่วนขนาดหัวฉีด 2.3 มิลลิเมตร สามารถเพิ่มจำนวนหัวฉีดได้เนื่องจากไม่ติดข้อจำกัดของความดันของหัวฉีด
4	ปริมาณคอนเซนเทรท		✓	จากการศึกษาข้อมูลพบว่าช่วงก่อนจะปิดระบบเพอมิเอตไม่ไหลออกจากเมมเบรนทำให้ปริมาณคอนเซนเทรทในระบบคงที่ จึงไม่

				สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้
5	ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน	✓		ปริมาณน้ำที่ใช้ล้างเมมเบรนจริงและปริมาณน้ำล้างเมมเบรนที่ได้จากคำนวณไม่ตรงกัน มีค่าต่างกันมากจึงต้องลดปริมาณน้ำล้างเมมเบรนที่ใช้งานจริง ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำล้างเมมเบรนที่เหมาะสมโดยมีแนวทางโดยการลดปริมาณน้ำล้างเมมเบรนแต่ต้องคำนึงถึงว่าหากลดปริมาณน้ำล้างเมมเบรนมากเกินไปจะทำให้สีค้างอยู่ภายในเมมเบรนจึงต้องกำหนดค่าปริมาณน้ำล้างเมมเบรนที่เหมาะสมและในการกำหนดระดับของค่าปัจจัยที่จะทำการทดลองจะพิจารณาจากค่าที่จากการคำนวณ
6	ปริมาณน้ำล้างระบบ	✓		เช่นเดียวกับน้ำล้างเมมเบรนคือปริมาณน้ำที่ได้จากคำนวณไม่ตรงกับปริมาณน้ำที่ใช้งานจริงจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

4.3 สรุปผลขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

จากการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาสามารถสรุปรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังนี้

4.3.1 สรุปการวิเคราะห์ความเที่ยงและความแม่นของระบบการวัด

ในระบบการวัดของกระบวนการผลิตสีย้อมผ้าซึ่งประกอบด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยจะใช้ระบบเซนเซอร์มาตรฐานในการตรวจจับทั้งหมดและได้ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานตามระยะเวลาที่กำหนดทุกปี ซึ่งการตรวจเช็คที่ในระยะเวลาที่กำหนดอย่างสม่ำเสมอแล้วทำให้ระบบการวัดของทางโรงงานกรณีศึกษามีความเที่ยงและความแม่นในการวัด เมื่อทดสอบระบบการวัดให้มีความน่าเชื่อถือแล้วจึงทำการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุของปัญหาต่อไป

4.3.2 สรุปการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า

จากการระดมสมองกับสมาชิกภายในทีมพบว่า ปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าผลิตภาพสีดีดายต่ำมีทั้งหมดโดยใช้หลักการ 4M มีดังนี้

1. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับพนักงาน
2. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร
3. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ
4. ปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ

หลังจากแบ่งปัจจัยเป็นหมวดหมู่แล้วจึงระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ผลิตภาพต่ำ โดยใช้แผนผังแสดงความสัมพันธ์ซึ่งมีทั้งหมด 7 ปัจจัย แต่ผู้วิจัยได้พบว่าปัจจัยปริมาณเนื้อสีในน้ำสามารถศึกษาปัจจัยได้ในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสโดยใช้แผนผังหาสาเหตุและผลซึ่งมีทั้งหมด 11 ปัจจัย หลังจากนั้นจึงกรองปัจจัยนำเข้าด้วยการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลตามเกณฑ์การให้คะแนนดังตารางที่ 4.1 หลังจากนั้นจึงให้ตัวแทนในแต่ละกะลงคะแนนตามความสำคัญ หลังจากนั้นจึงพิจารณาจากผลรวมของคะแนนแต่ละปัจจัยแล้วจึงพล็อตกราฟพาเรโตเพื่อเลือกปัจจัยที่จะทำการศึกษาต่อคือ อุณหภูมิอากาศร้อน จำนวนหัวฉีด ขนาดหัวฉีด ปริมาณคอนเซนเทรท ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน และปริมาณน้ำล้างระบบ แต่ผู้วิจัยและทีมได้พบข้อจำกัดของปัจจัยปริมาณคอนเซนเทรตดังตารางที่ 4.4 จึงเหลือปัจจัยเพียง 5 ปัจจัยในการศึกษาต่อโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนการวิเคราะห์นี้จะนำปัจจัยทั้งห้าที่ผ่านการคัดกรองในขั้นตอนก่อนหน้าได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อน ขนาดหัวฉีด จำนวนหัวฉีด ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน และปริมาณน้ำล้างระบบ มาวิเคราะห์เพื่อพิสูจน์ว่าปัจจัยนำเข้าตัวใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญและหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ผลิตภาพของสีดีดายมากที่สุดโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design, RSM) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างเทอมที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise)

5.1 การออกแบบการทดลอง

5.1.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง

การออกแบบการทดลองครั้งนี้มีปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนหัวฉีด ขนาดหัวฉีด ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ อุณหภูมิอากาศร้อน ซึ่งทั้ง 5 ปัจจัยอยู่ในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำไปทำการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตัวแปรตอบสนอง คือ ผลิตภาพของสีดีดาย

5.1.2 การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time; OFAT)

เนื่องจากว่าปัจจัยจำนวนหัวฉีดและขนาดหัวฉีดมีระยะห่างของระดับที่ไม่เท่ากันทำให้ระดับที่จะทำการทดลองได้ไม่เป็นไปตามโครงสร้างของระดับของวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง ทำให้ไม่สามารถทดลองร่วมกับอีก 3 ปัจจัยได้ จึงต้องทำการทดลองแยก โดยใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า ซึ่งการทดลองแบบนี้เป็นการทดลองสำหรับ 1 ปัจจัย โดยระดับการทดลองมี 4 ระดับดังตารางที่ 5.1 ทั้งนี้การกำหนดระดับของขนาดหัวฉีดจะอิงจากค่าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือ หัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 มิลลิเมตร แล้วจึงเพิ่มขนาดของหัวฉีดจนถึงขนาด 2.75 มิลลิเมตร เนื่องจากมีงานวิจัยของ T. Jamaleddine และคณะ ได้กล่าวว่า การเพิ่มขนาดหัวฉีดจะทำให้ผลิตภาพเพิ่มขึ้น แต่ทางผู้วิจัยเลือกที่ศึกษาในช่วง 2.3 – 2.75 มิลลิเมตร เนื่องจากว่า ขนาดหัวฉีดที่น้อยกว่า 2.3 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดที่มากกว่า 2.75 จะส่งผลให้อนุภาคของสีไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้คือ 50 – 100 ไมครอน และกำหนดให้อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 2,500 กิโลกรัม และปริมาณน้ำล้างระบบ 500 กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าปัจจุบันที่ใช้ในกระบวนการ

ผลิตสีและมีจำนวนการทดลองซ้ำ 9 ครั้ง หลังจากที่ได้ข้อมูลผลิตภาพที่แต่ละขนาดหัวฉีดแล้วจึงทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อดูว่าขนาดของหัวฉีดที่แตกต่างกันมีผลต่อผลิตภาพของสีอย่างมีนัยสำคัญหรือหรือไม่จากนั้นใช้การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Turkey เพื่อหาว่าขนาดหัวฉีดคู่ใดให้ค่าผลิตภาพที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและขนาดใดที่ให้ผลิตภาพสูงที่สุด

5.1.3 การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken)

จากปัจจัยที่เหลือข้างต้นเพียง 3 ปัจจัย คือ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบและอุณหภูมิอากาศร้อน ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองแบบบอกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากว่าหากใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางจะมีจำนวนการทดลอง 20 การทดลอง ในขณะที่การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน มีจำนวนการทดลอง 15 การทดลองซึ่งน้อยกว่าการออกแบบแบบการทดลองแบบประสมกลาง ผู้วิจัยจึงเลือกการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากระยะเวลาการทดลองในกระบวนการนาน แล้วจึงทำการกำหนดระดับการทดลองของปัจจัยดังตารางที่ 5.1 ซึ่งมีระดับสูง (+1) ระดับกลาง (0) และระดับต่ำ (-1) โดยค่าระดับการทดลองของปัจจัยปริมาณน้ำล้างเมมเบรนปัจจุบันอยู่ที่ระดับสูง ค่าระดับการทดลองของปัจจัยปริมาณน้ำล้างระบบปัจจุบันอยู่ที่ระดับสูง และค่าระดับการทดลองของปัจจัยอุณหภูมิอากาศร้อนอยู่ที่ระดับต่ำเนื่องจาก ในงานวิจัยจากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการลดปริมาณน้ำล้างเมมเบรนทำให้มีผลิตภาพมากขึ้นซึ่งได้ใช้ระดับต่ำเป็น 1300 กิโลกรัมเนื่องจาก ผู้วิจัยได้ประชุมปรึกษากับสมาชิกในทีมและคาดคะเนจากการทำงานจริงซึ่งอาจจะใช้น้ำล้างเมมเบรนเพียงแค่ 1300 กิโลกรัม การลดปริมาณน้ำล้างระบบจะทำให้ผลิตภาพเพิ่มมากขึ้นจึงเลือกระดับต่ำเป็น 200 กิโลกรัม เนื่องจากว่า สอบถามพนักงานที่มีประสบการณ์กับการทำงานซึ่งพนักงานคิดว่าอาจจะใช้น้ำล้างระบบเพียง 200 กิโลกรัม และการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจะทำให้เผลิตภาพเพิ่มมาก ผู้วิจัยได้เลือกระดับสูงเป็น 120 องศาเซลเซียส เพราะว่า เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่เครื่องจักรจะรับได้

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการออกแบบการทดลอง

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	หน่วย	-1	0	+1
1	ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน	A	กิโลกรัม	1300	1900	2500
2	ปริมาณน้ำล้างระบบ	B	กิโลกรัม	200	350	50
3	อุณหภูมิอากาศร้อน	C	$^{\circ}C$	100	110	120

หลังจากที่กำหนดระดับการทดลองแล้วจึงสร้างเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) โดยกำหนดให้มีการสุ่มการทดลอง (Randomization) เพื่อให้ผลการทดลองเป็นอิสระต่อกัน ในงานวิจัย

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาปัจจัยด้วยกันและเป็นปัจจัยแบบแปรผัน (Variable Factors) ซึ่งจะได้การทดลองทั้งหมด 15 การทดลองดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix)

Box-Behnken Design

```
Factors:       3     Replicates:     1
Base runs:    15     Total runs:    15
Base blocks:   1     Total blocks:   1

Center points: 3
```

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C
12	1	2	1	1900	500	120
13	2	0	1	1900	350	110
4	3	2	1	2500	500	110
3	4	2	1	1300	500	110
6	5	2	1	2500	350	100
9	6	2	1	1900	200	100
5	7	2	1	1300	350	100
1	8	2	1	1300	200	110
10	9	2	1	1900	500	100
7	10	2	1	1300	350	120
11	11	2	1	1900	200	120
2	12	2	1	2500	200	110
8	13	2	1	2500	350	120
15	14	0	1	1900	350	110
14	15	0	1	1900	350	110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 การคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดลอง (Sample Size Design)

5.2.1 การคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า

การหาขนาดตัวอย่างของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่าจะใช้วิธีการคำนวณขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) เนื่องจากปัจจัยที่ศึกษา

มี 4 ระดับ โดยกำหนดกำลังการทดสอบ (Power of test) เป็น 0.9 ค่า Maximum Difference ที่ต้องการตรวจจับเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นค่าประมาณของค่าความแตกต่างของผลิตภาพที่ระดับหัวฉีดที่มีค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด และโดยผลิตภาพของสีดีดายมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.5 โดยคำนวณมาจากข้อมูลเบื้องต้นที่เก็บมาดังตารางที่ 5.3 จากการคำนวณได้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 9 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.1

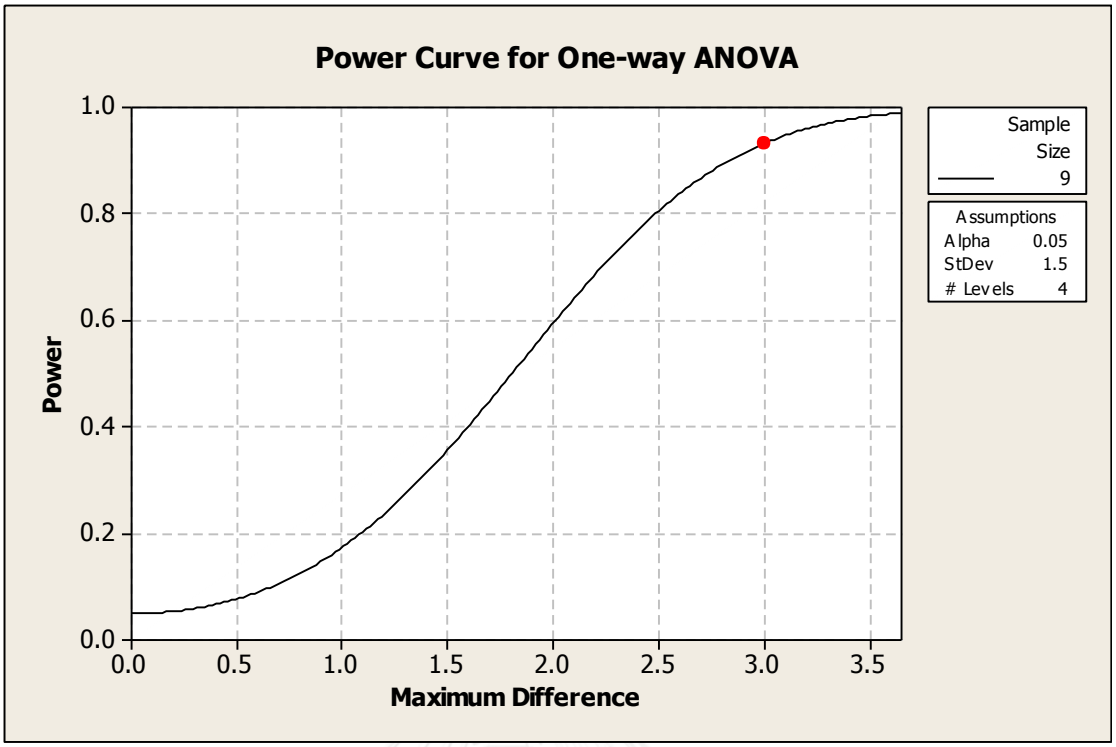
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลผลิตภาพของสีประเภทดีดายในเดือนกันยายน พ.ศ.2559

ชั่วโมง	**ผลิตภาพ (เปอร์เซ็นต์)**	**ชั่วโมง**	**ผลิตภาพ (เปอร์เซ็นต์)**
ชั่วโมงที่ 1	20.86	ชั่วโมงที่ 10	19.97
ชั่วโมงที่ 2	21.62	ชั่วโมงที่ 12	19.87
ชั่วโมงที่ 3	19.96	ชั่วโมงที่ 13	18.57
ชั่วโมงที่ 4	21.43	ชั่วโมงที่ 14	17.04
ชั่วโมงที่ 5	20.73	ชั่วโมงที่ 15	17.66
ชั่วโมงที่ 6	21.24	ชั่วโมงที่ 16	17.15
ชั่วโมงที่ 7	20.61	ชั่วโมงที่ 17	17.04
ชั่วโมงที่ 8	19.54	ชั่วโมงที่ 18	18.02
ชั่วโมงที่ 9	18.23	ชั่วโมงที่ 19	19.98
ชั่วโมงที่ 10	18.55	ชั่วโมงที่ 20	20.78
ค่าเฉลี่ย		19.44	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.5	

ตารางที่ 5.4 ผลการหาขนาดตัวอย่างแบบความแปรปรวนแบบทางเดียว

Power and Sample Size

```
One-way ANOVA

Alpha = 0.05  Assumed standard deviation = 1.5

Factors: 1  Number of levels: 4


   Maximum  Sample  Target
Difference    Size   Power  Actual Power
         3       9     0.9      0.932577

The sample size is for each level.
```



รูปที่ 5.1 การหาขนาดตัวอย่างโดยใช้วิธีความแปรปรวนแบบทางเดียว

5.2.1 การคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

เนื่องจากว่าจำนวนการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน มีทั้งหมด 15 การทดลอง แต่ในการทดลองแต่ละการทดลองใช้เวลานาน และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทดลองสูง เมื่อพิจารณาข้อจำกัดในเรื่องของเวลาและค่าใช้จ่ายทำให้ในแต่ละสภาวะการทดลองสามารถทดลองได้เพียงแค่ 1 ครั้ง ยกเว้นจุดศูนย์กลางจะมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณค่าความผันแปรอย่างสุ่มได้

5.3 การตรวจความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

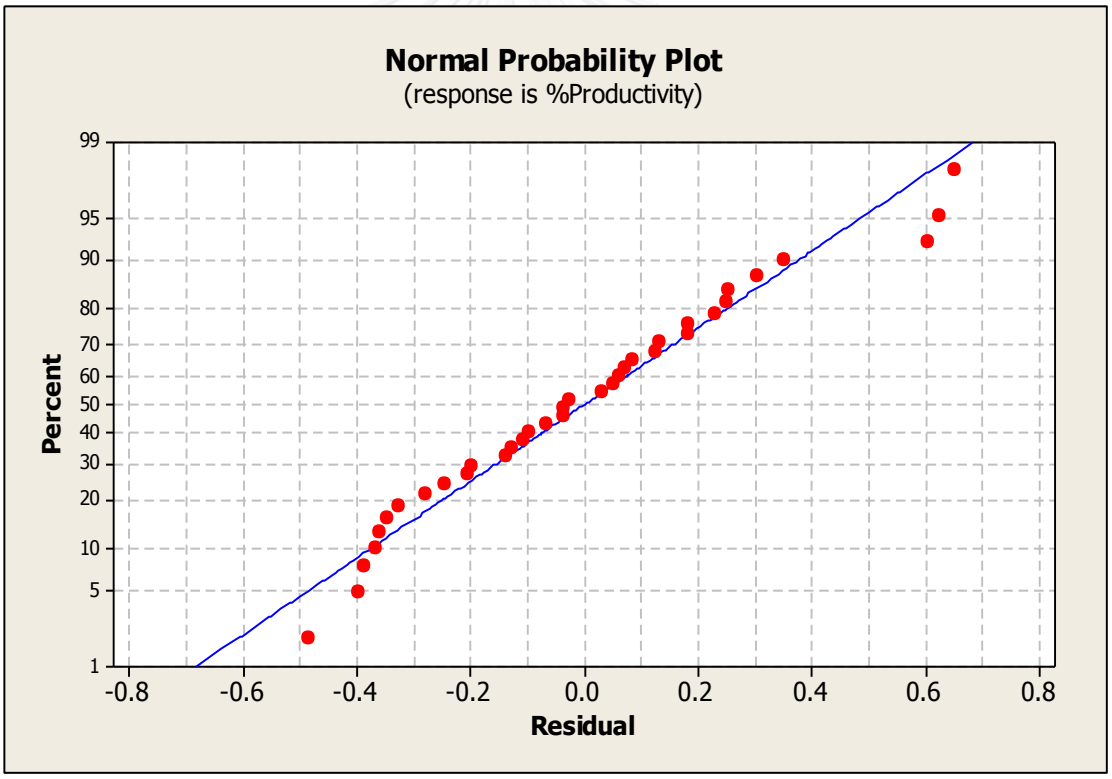
การวิเคราะห์ผลการทดลองนี้จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อน เพื่อเป็นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนนำมาวิเคราะห์แล้วจึงวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนต่อไปซึ่งจะทดสอบสมมติฐาน 3 ข้อดังนี้

1) สมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)
2) สมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual)
3) สมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability)

5.3.1 การวิเคราะห์การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า

5.3.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

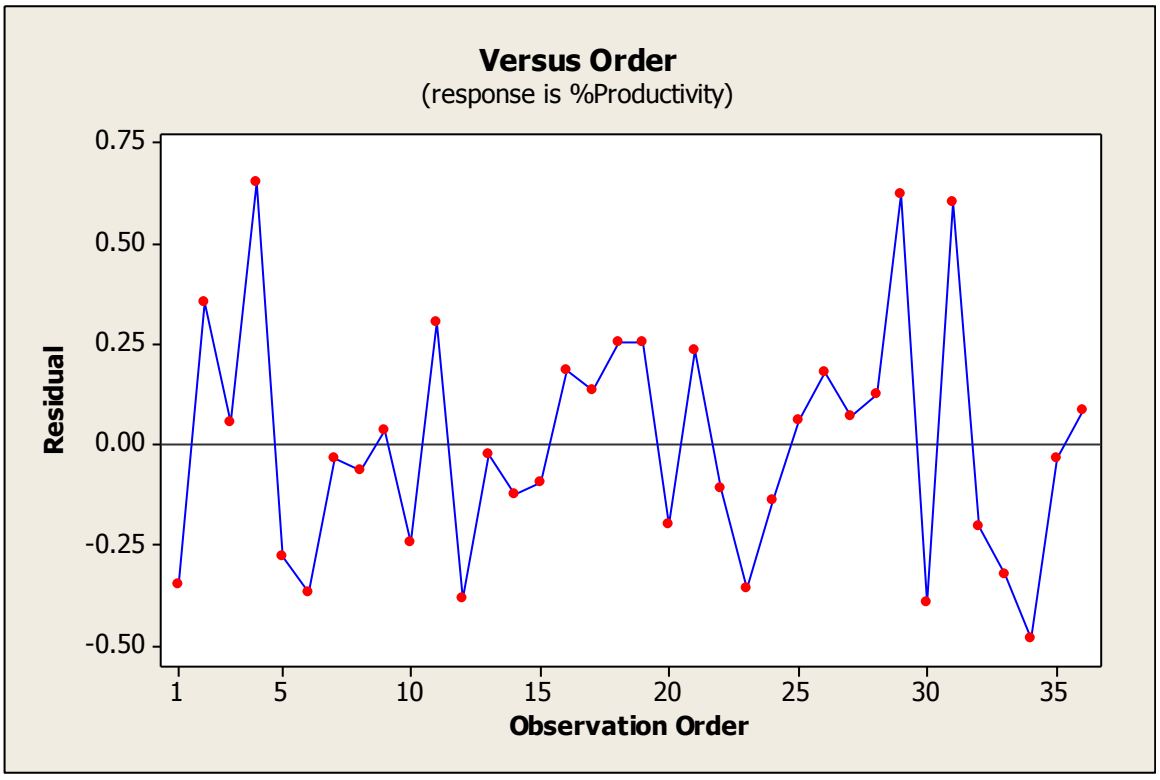
การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งหากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ควรจะมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง จากผลการทดลองพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลของตัวแปรตอบสนองมีการแจกแจงปกติดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การทดสอบสมมติฐานการของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า

5.3.1.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual)

การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูลพิจารณาได้จากการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งจากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือไม่มีรูปร่างแน่นอน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

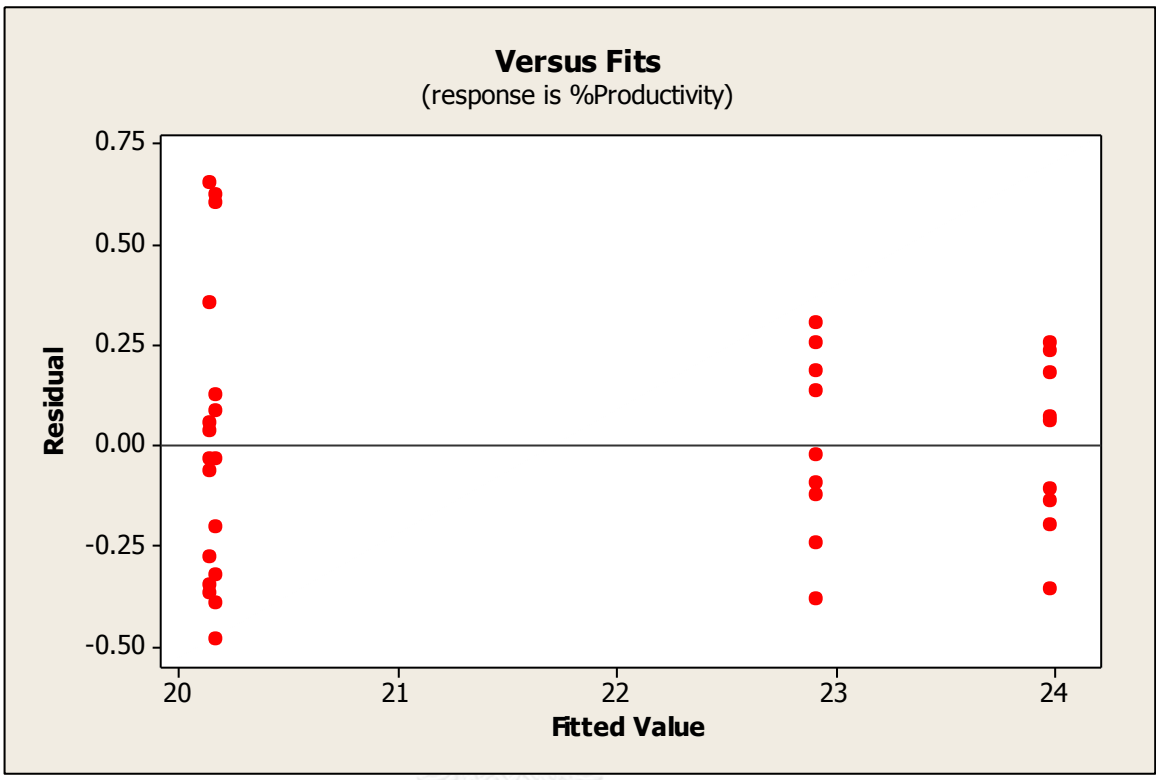


รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูลของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า

5.3.1.3 การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนคงที่สามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวระหว่างส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งแผนภาพการกระจายตัวไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้ม หรือ

มีการกระจายตัวเป็นรูปกรวยปากเปิด จากรูปที่ 5.4 พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นแนวโน้มหรือมีการกระจายตัวเป็นรูปกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่



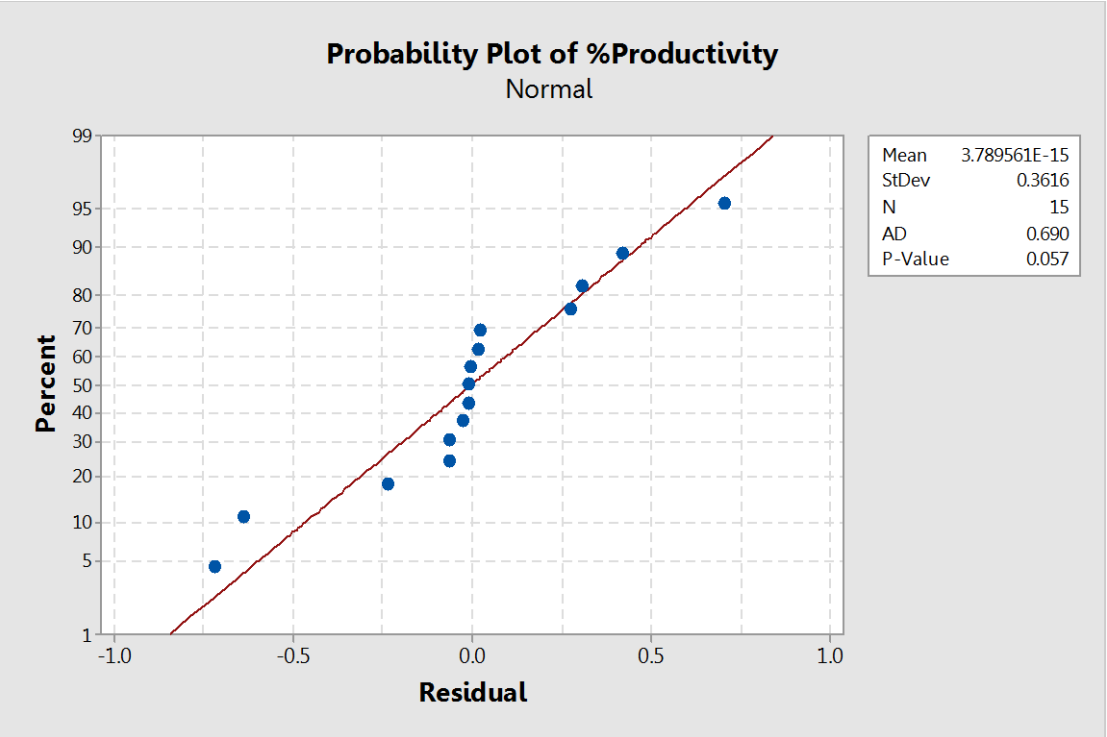
รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิตของการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของแต่ละตัวแปรตอบสนอง สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระของข้อมูล และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ต่อไป

5.3.2 การวิเคราะห์การทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

5.3.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

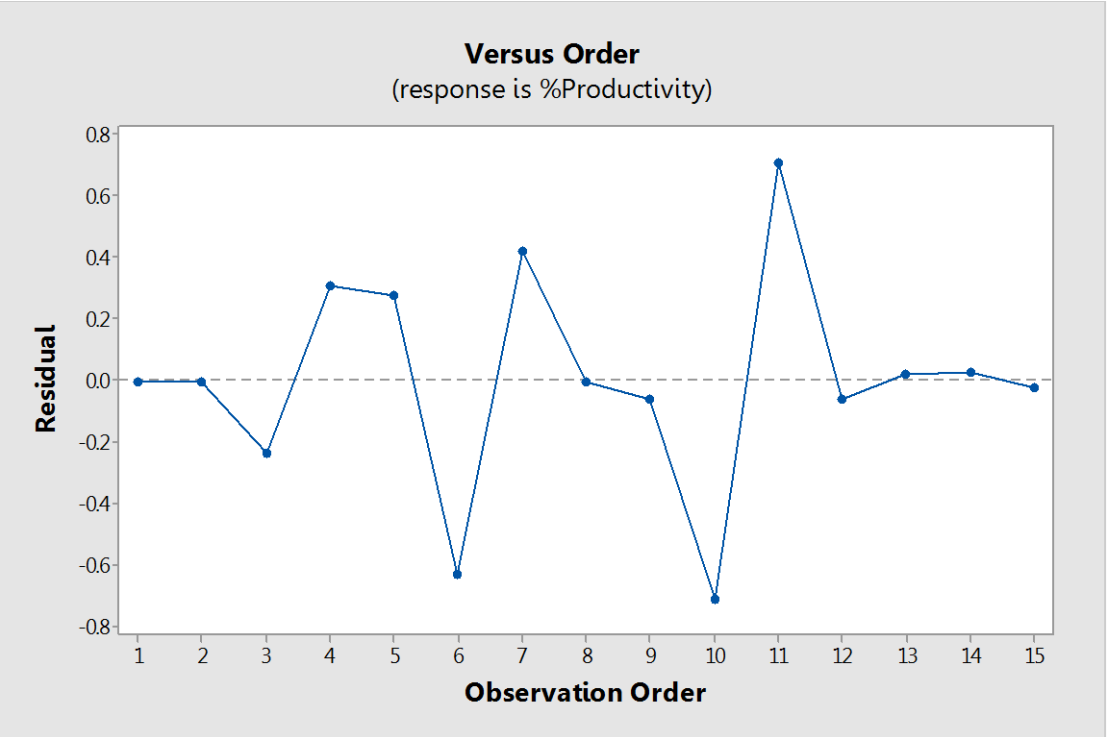
การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งหากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ควรจะมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงหรือมีค่า p-value มากกว่า 0.05 ซึ่งจากรูปที่ 5.5 พบว่า ค่า p-value เท่ากับ 0.057 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานการแจกแจงปกติ



รูปที่ 5.5 การทดสอบสมมติฐานการของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

5.3.2.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual)

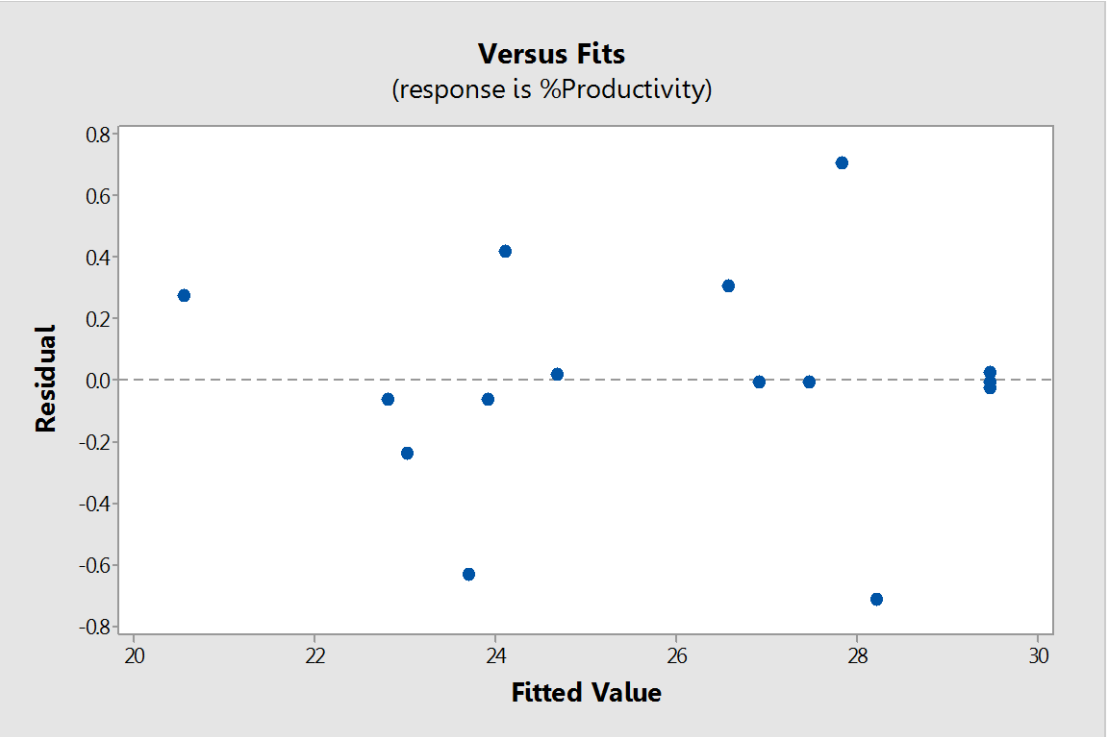
การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูลพิจารณาได้จากการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งจากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือไม่มีรูปร่างแน่นอน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูลของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

5.3.2.3 การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนคงที่สามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวระหว่างส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งแผนภาพการกระจายตัวไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวเป็นรูปกรวยปากเปิด จากรูปที่ 5.7 พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นแนวโน้มหรือมีการกระจายตัวเป็นรูปกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิตของการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของแต่ละตัวแปรตอบสนอง สามารถสรุปได้ว่า ผลการทดลองแต่ละสภาวะการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระของข้อมูล และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.4 ผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองเพื่อให้ค่าแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมต่อตัวแปรตอบสนอง โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่าและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

5.4.1 ผลการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า

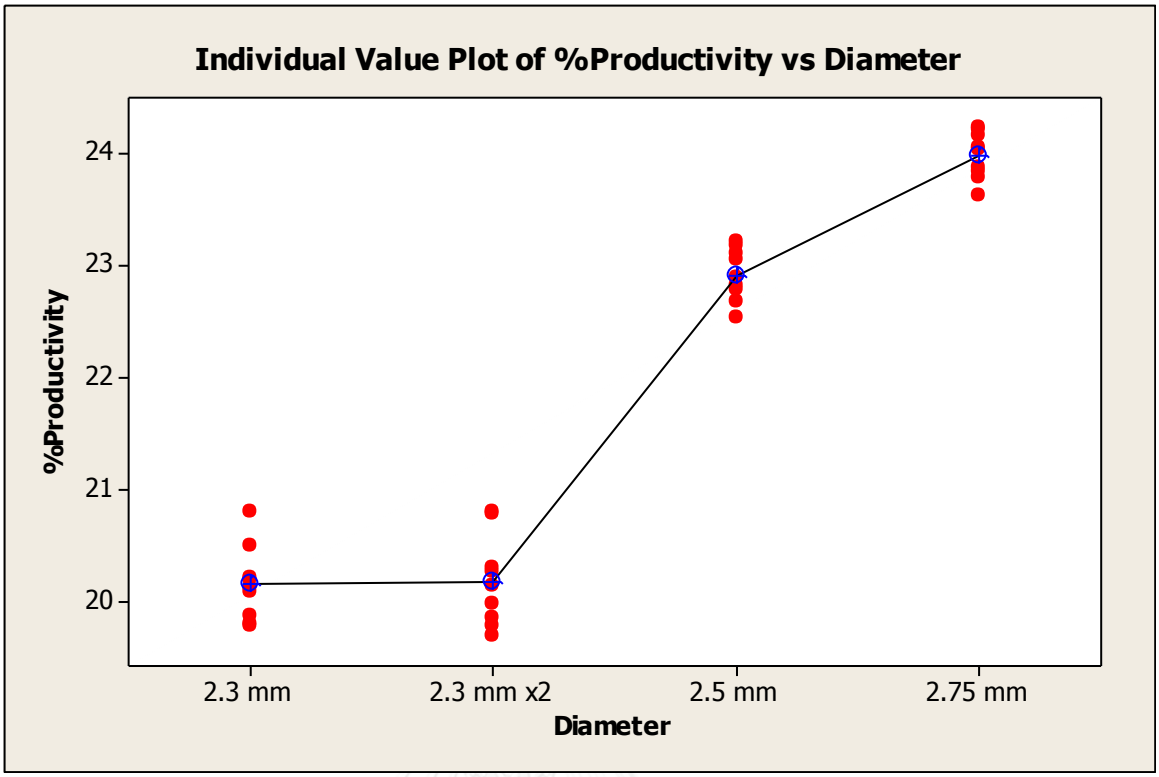
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่าในการหาขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมและนำขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมไปใช้กับการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคนต่อไป และยังทดสอบขนาดหัวฉีดมีผลต่อผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ในการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่านี้มีทั้งหมด 4 ระดับคือ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร 2.75 มิลลิเมตร และ 2.3 มิลลิเมตร 2 หัว โดยใช้น้ำล้างเมมเบรน น้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อนเป็นค่าปัจจุบันที่ใช้อยู่ ซึ่งให้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.8 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยขนาดหัวฉีดและผลการทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าผลิตภาพที่ขนาดหัวฉีด 4 ระดับ

One-way ANOVA: %Productivity versus Diameter

```
Source    DF        SS       MS       F      P
Diameter   3  102.2676  34.0892  361.95  0.000
Error     32    3.0138   0.0942
Total     35  105.2814

S = 0.3069   R-Sq = 97.14%   R-Sq(adj) = 96.87%


                            Individual 95% CIs For Mean Based on
                            Pooled StDev
Level      N    Mean  StDev  ----+---------+---------+---------+-----
2.3 mm     9  20.147  0.334  (-*-)
2.3 mm x2  9  20.174  0.406  (-*-)
2.5 mm     9  22.916  0.236                    (-*-)
2.75 mm    9  23.978  0.211                             (-*-)
                            ----+---------+---------+---------+-----
                             20.4      21.6      22.8      24.0

Pooled StDev = 0.307


Grouping Information Using Tukey Method

Diameter   N     Mean  Grouping
2.75 mm    9  23.9778  A
2.5 mm     9  22.9156    B
2.3 mm x2  9  20.1744      C
2.3 mm     9  20.1467      C

Means that do not share a letter are significantly different.
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.8 แผนภาพเปรียบเทียบผลิตภาพที่ขนาดหัวฉีด 4 ระดับ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ขนาดของหัวฉีดมีผลต่อผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบพหุคูณแบบ Turkey พบว่า ขนาดหัวฉีด 2.75 มิลลิเมตร อยู่ในกลุ่ม A ขนาดหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร อยู่ในกลุ่ม B และขนาดหัวฉีด 2.3 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีด 2.3 มิลลิเมตร 2 หัว อยู่ในกลุ่ม C ดังรูปที่ 6 และสามารถสรุปได้ว่า ที่หัวฉีดขนาด 2.3 มิลลิเมตร และ 2.3 มิลลิเมตร 2 หัว ไม่มีความแตกต่างกันของผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญเพราะว่าขนาดหัวฉีดทั้ง 2 ระดับ เป็นขนาดหัวฉีดเดียวกันแต่ต่างกันที่จำนวนหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดขนาด 2.3 ม.ม จำนวน 2 หัว จะมีวัตถุป้อนเข้าเป็น 2 เท่า และผลผลิตเป็น 2 เท่าของขนาดหัวฉีด 2.3 มิลลิเมตร 1 หัว ซึ่งทำให้มีค่าผลิตภาพไม่แตกต่างกับขนาดหัวฉีด 2.3 มิลลิเมตร 1 หัว ที่หัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และ 2.7 มิลลิเมตร ให้ค่าผลิตภาพสูงกว่าขนาด 2.3 มิลลิเมตร และ 2.3 มิลลิเมตร 2 หัว อย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าหัวฉีดขนาด 2.7 มิลลิเมตร จะได้ผลิตภาพมากกว่าหัวฉีดขนาด 2.5 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญแต่เมื่อใช้ขนาดหัวฉีด 2.75 มิลลิเมตร จะต้องใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้ามากกว่า 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้สีเกิดการไหม้จึงไม่สามารถส่งมอบให้ลูกค้าได้ ที่ทราบว่าสีไหม้เนื่องจากว่าทางโรงงานได้รับการร้องเรียนจากลูกค้าว่าเมื่อนำผงสีละลายน้ำแล้วเกิดมีจุดเล็ก ๆ สีดำติดอยู่ที่หัวพิมพ์หมึก ทางโรงงานจึงทำการตรวจสอบสีก่อนเข้ากระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า ไม่มีจุดสีดำบน

กระดาษ จากนั้นจึงได้ทำการตรวจสอบกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยการทดลองเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าตั้งแต่ 200 เซลเซียส เมื่อนำผงสีไปละลายน้ำและกรองใส่กระดาษพบว่ามีจุดสีดำ ซึ่งเกิดจากสีไหม้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกหัวฉีดขนาด 2.5 มิลลิเมตร มาใช้งานและใช้ในการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ต่อไป

5.4.2 ผลการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

หลังจากที่หาขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมได้คือ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และหลังจากนั้นผู้วิจัยได้ใช้ขนาดหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร มาทดลองในการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ซึ่งมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ น้ำล้างเมมเบรน น้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อน ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้ง 15 การทดลอง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.6 และ 5.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ด้วยโปรแกรมมินิแทป

Response Surface Regression: %Productivity versus A, B, C

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for %Productivity

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-331.293	31.7586	-10.432	0.000
A	0.021	0.0051	4.177	0.009
B	0.075	0.0196	3.825	0.012
C	5.805	0.5481	10.590	0.000
A*A	-0.000	0.0000	-10.603	0.000
B*B	-0.000	0.0000	-6.723	0.001
C*C	-0.025	0.0025	-10.338	0.000
A*B	-0.000	0.0000	-0.519	0.626
A*C	0.000	0.0000	0.827	0.446
B*C	-0.000	0.0002	-1.389	0.224

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.481890	98.98%	97.13%	83.63%

Analysis of Variance for %Productivity

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	113.101	113.101	12.5668	56.50	0.000
Linear	3	61.017	27.802	9.2673	41.66	0.001
A	1	24.957	3.880	3.8804	17.45	0.009
B	1	1.656	3.255	3.2551	14.63	0.012
C	1	34.404	24.943	24.9434	112.14	0.000
Square	3	51.443	51.443	17.1477	77.09	0.000
A*A	1	19.808	25.008	25.0080	112.43	0.000
B*B	1	7.861	10.052	10.0523	45.19	0.001
C*C	1	23.774	23.774	23.7744	106.88	0.000
Interaction	3	0.641	0.641	0.2137	0.96	0.479
A*B	1	0.060	0.060	0.0600	0.27	0.626
A*C	1	0.152	0.152	0.1521	0.68	0.446
B*C	1	0.429	0.429	0.4290	1.93	0.224
Residual Error	5	1.112	1.112	0.2224		
Lack-of-Fit	3	1.110	1.110	0.3701	411.25	0.002
Pure Error	2	0.002	0.002	0.0009		
Total	14	114.213				

ตารางที่ 5.7 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

RunOrder	A	B	C	ผลิตภาพ (เปอร์เซ็นต์)
1	1900	500	120	27.20
2	1900	350	110	29.67
3	2500	500	110	22.78
4	1300	500	110	26.88
5	2500	350	100	20.82
6	1900	200	100	23.07
7	1300	350	100	24.10
8	1300	200	110	27.47
9	1900	500	100	22.74
10	1300	350	120	27.51
11	1900	200	120	28.54
12	2500	200	110	23.86
13	2500	350	120	24.59
14	1900	350	110	29.80
15	1900	350	110	29.53

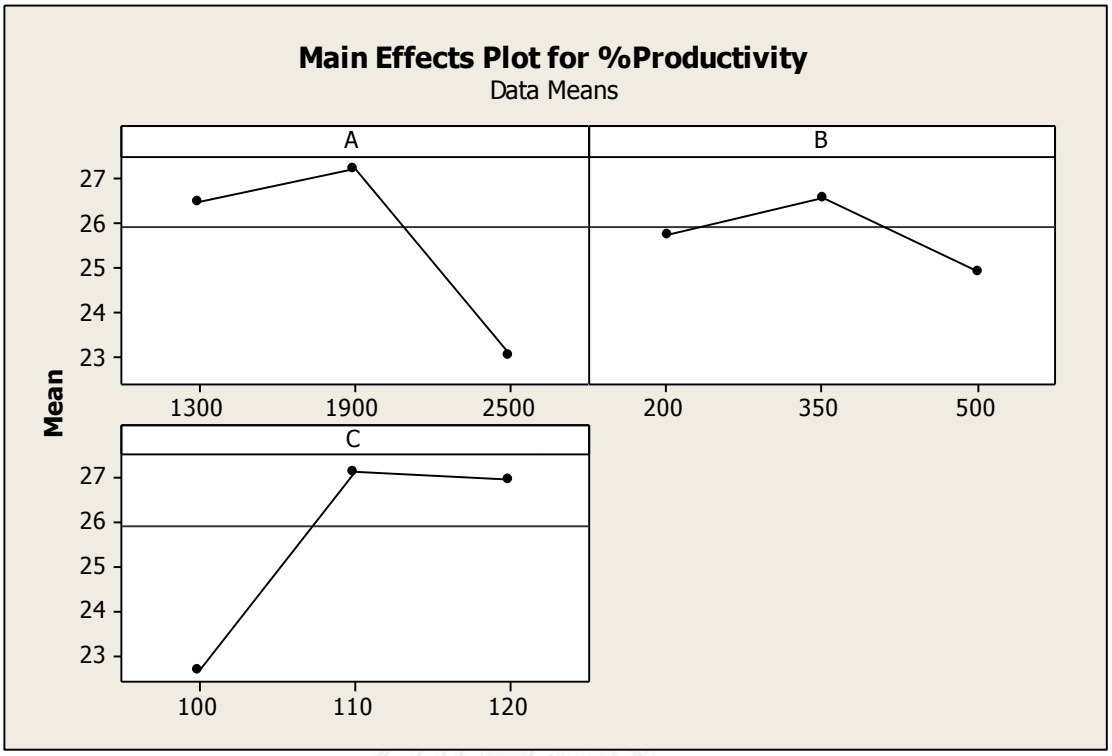
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากผลการทดลองจากโปรแกรมมินิแทปดังตารางที่ 5.5 เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยทั้ง 3 คือ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน (A) ปริมาณน้ำล้างระบบ (B) และอุณหภูมิอากาศร้อน (C) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าผลิตภาพที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือปัจจัยนำเข้ามีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งจากตารางที่ 5.5 ยังพบว่า ปัจจัยทั้ง 3 ส่งผลกระทบหลัก (Main Effect) และพจน์ของผลหลักกำลังสอง (Second Order) ของปริมาณน้ำล้างเมมเบรน (A*A) ปริมาณน้ำล้างระบบ (B*B) และอุณหภูมิอากาศร้อน (C*C) มีผลต่อค่าผลิตภาพมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือปัจจัยนำเข้ามีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 และผลกระทบร่วม (Interaction Effect) ไม่มีผลต่อผลิตภาพของสีอย่างมีนัยสำคัญ

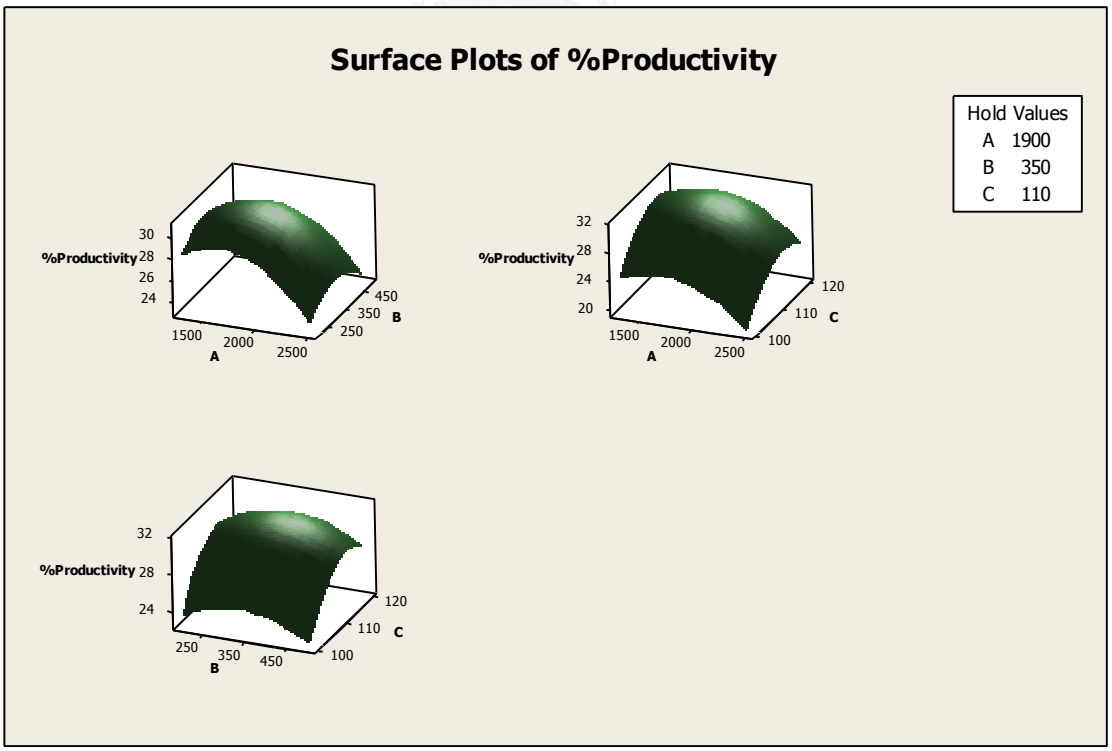
เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอย (Lack-of-Fit) พบว่า มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า แบบจำลองที่ได้ยังไม่เหมาะสมกับข้อมูลที่สุด เนื่องจากแบบจำลองในงานวิจัยเป็นแบบจำลองกำลังสองซึ่งอาจมีแบบจำลองอื่นที่ดีกว่าเช่น แบบจำลองกำลังสาม แบบจำลอง

กำลังสี่ เป็นต้น เพราะฉะนั้นในงานวิจัยครั้งถัดไปอาจจะหาแบบจำลองอื่นที่เหมาะสมกว่าเพื่อเพิ่มค่าความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอย แต่ผู้วิจัยได้ยอมรับแบบจำลองถดถอยนี้เนื่องจากว่า ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 98.98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นอย่างมาก แสดงว่า เทอมของตัวแปรต้นในแบบจำลองถดถอยเพียงพอต่อการอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นของตัวแปรตอบสนอง [40]

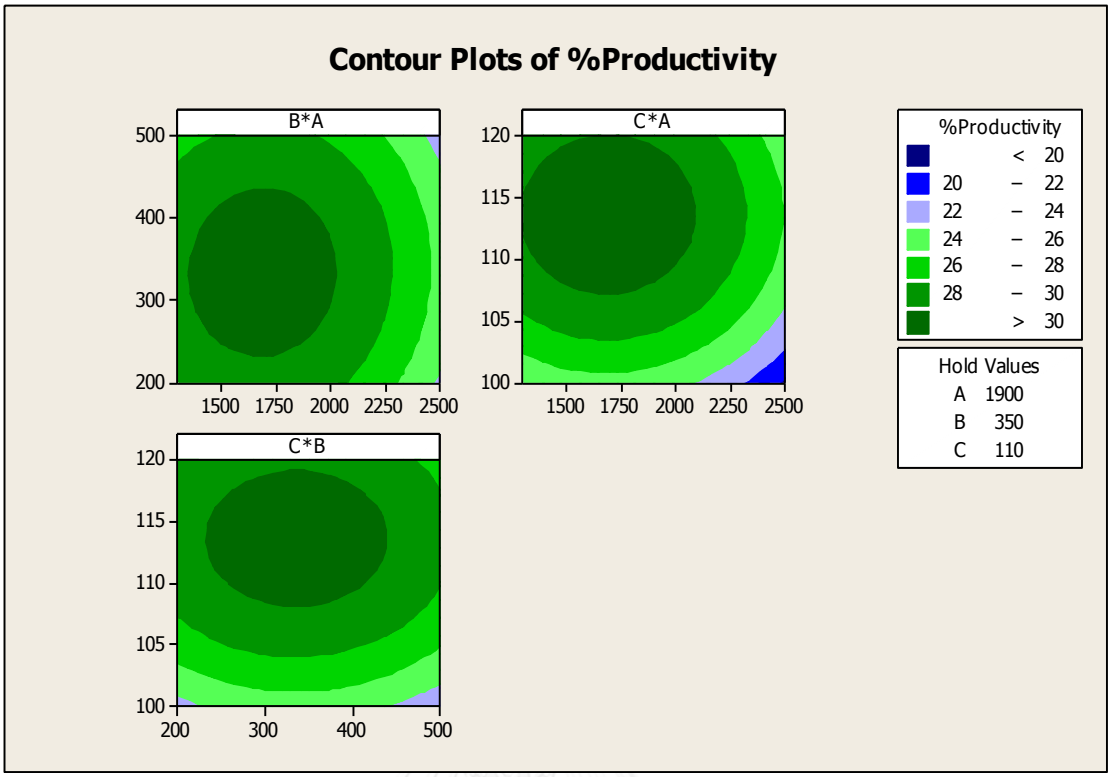
เนื่องจากว่าผลกระทบร่วมไม่มีผลต่อผลิตภาพ จึงสามารถอธิบายผลของปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองด้วยผลกระทบหลักจากรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ซึ่งจากรูปที่ 5.10 ซึ่งเป็นแผนภาพพื้นผิว (Surface Plot) จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำล้างเมมเบรน (A) ปริมาณน้ำล้างระบบ (B) และอุณหภูมิอากาศร้อน (C) มีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งและสามารถกล่าวได้ว่า สภาวะที่ดีที่สุดจะอยู่ที่จุดยอดสุดของเส้นโค้งระฆังคว่ำซึ่งสามารถอธิบายความหมายของแต่ละปัจจัยได้โดยพิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัยน้ำล้างเมมเบรนพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำล้างเมมเบรนจากระดับต่ำมายังระดับกลางพบว่า มีค่าผลิตภาพเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าสีที่ติดอยู่ภายในเมมเบรนได้ออกมามากขึ้น ทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำมากขึ้นส่งผลให้ผลิตภาพมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำล้างเมมเบรนจากระดับกลางไปยังระดับสูงพบว่า มีค่าผลิตภาพลดลงอย่างมากเป็นผลมาจากว่าการเพิ่มปริมาณน้ำเมมเบรนมากเกินไปจะทำให้สีมีน้ำรวมอยู่ในสีมากทำให้สีเจือจางลงส่งผลให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยลงค่าผลิตภาพจึงต่ำลง ผลกระทบของปริมาณน้ำล้างระบบพบว่า เมื่อเปลี่ยนระดับน้ำล้างระบบจากระดับต่ำมายังระดับกลางมีค่าผลิตภาพเพิ่มขึ้นเพราะว่าเกิดการชะล้างสีที่ค้างอยู่ภายในระบบออกมามากขึ้น ทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำมากขึ้นส่งผลให้ค่าผลิตภาพมากขึ้น แต่เมื่อเปลี่ยนปริมาณน้ำล้างระบบจากระดับกลางไปยังระดับสูงพบว่ามีค่าผลิตภาพลดลงเพราะว่าปริมาณน้ำล้างระบบมากเกินไปทำให้สีเจือจางลงส่งผลให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยลง ทำให้ค่าผลิตภาพลดลงด้วยเช่นกันซึ่งมีแนวโน้มและสาเหตุเช่นเดียวกับน้ำล้างเมมเบรน ส่วนผลกระทบของอุณหภูมิอากาศร้อนพบว่า เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศร้อนจากระดับต่ำไปยังระดับกลางพบว่ามีผลิตภาพเพิ่มขึ้นอย่างมากเพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนมีอัตราการระเหยที่สูงขึ้นทำให้สีที่สเปรย์ออกมาเป็นผงสีมากขึ้น และเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศร้อนจากระดับกลางเป็นระดับสูงพบว่ามีค่าผลิตภาพลดลงเนื่องจากว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนที่มากเกินไปจะทำให้ผงสีมีความชื้นต่ำแล้วจึงเกิดเป็นฝุ่นผงมากขึ้น



รูปที่ 5.9 ผลกระทบหลักของปัจจัย A B และ C ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพ



รูปที่ 5.10 แผนภาพพื้นผิวที่มีต่อผลิตภาพ



รูปที่ 5.11 แผนภาพคอนทัวร์ที่มีต่อผลิตภาพ

จากรูปที่ 5.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลิตภาพของสีดีดายและปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าระดับทั้ง 3 ปัจจัย ที่ส่งผลกระทบให้ผลิตภาพของสีดีดายสูงที่สุดที่ระดับช่วงกลาง และเมื่อขยับระดับของปัจจัยนำเข้าออกมากจากช่วงกลางจะทำให้ค่าผลิตภาพต่ำลง หรือสามารถกล่าวได้ว่าการตั้งค่าของปริมาณน้ำล้างเมมเบรน (A) ปริมาณน้ำล้างระบบ (B) และอุณหภูมิอากาศร้อน (C) ที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้ผลิตภาพต่ำลง

จากผลการทดลองการหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อผลิตภาพซึ่งปัจจัยทั้ง 3 คือ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน (A) ปริมาณน้ำล้างระบบ (B) และอุณหภูมิอากาศร้อน (C) จากนั้นผู้วิจัยได้หาสมการแบบถดถอย (Linear Regression) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยนำเข้าและค่าตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ในโปรแกรมมินิแทปโดยเลือกวิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน โดยผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.12 ได้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 5.1

ผลิตภาพ = $0.02426A - 0.04821B + 5.727C - 0.000007A^2 - 0.000073B^2 - -0.02509C^2 - 325$ (5.1)

โดยที่ A = ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน

B = ปริมาณน้ำล้างระบบ

C= อุณหภูมิอากาศร้อน

Regression Analysis: %Productivity versus A, B, C, AB, AC, BC, AA, BB, CC

Backward Elimination of Terms

Candidate terms: A, B, C, AB, AC, BC, AA, BB, CC

	Step 1		Step 2		Step 3	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	-326.5		-325.6		-333.3	
A	0.02070	0.011	0.02023	0.006	0.02426	0.000
B	0.0744	0.014	0.0719	0.007	0.0719	0.005
C	5.732	0.000	5.732	0.000	5.802	0.000
AB	-0.000001	0.633				
AC	0.000037	0.403	0.000037	0.367		
BC	-0.000215	0.238	-0.000215	0.203	-0.000215	0.194
AA	-0.000007	0.000	-0.000007	0.000	-0.000007	0.000
BB	-0.000073	0.001	-0.000073	0.000	-0.000073	0.000
CC	-0.02509	0.000	-0.02509	0.000	-0.02509	0.000
S		0.481890		0.451131		0.449558
R-sq		98.98%		97.92%		97.75%
R-sq(adj)		97.13%		96.49%		96.50%
R-sq(pred)		83.63%		83.41%		88.81%
Mallows' Cp		10.00		8.26		7.09

	Step 4	
	Coef	P
Constant	-325.0	
A	0.02426	0.000
B	0.04821	0.000
C	5.727	0.000
AB		
AC		
BC		
AA	-0.000007	0.000
BB	-0.000073	0.000
CC	-0.02509	0.000
S		0.478375
R-sq		98.39%
R-sq(adj)		97.17%
R-sq(pred)		93.54%
Mallows' Cp		6.88

α to remove = 0.05

รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากสมการที่ 5.1 มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือค่า R-Sq เท่ากับ 98.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถยอมรับสมการได้เนื่องจากว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้พยากรณ์ต่อไปได้

หลังจากที่ได้สมการถดถอยที่น่าเชื่อถือแล้วจึงทำการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยโดยใช้โปรแกรมมินิแทปในการหาค่าของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน (A) ปริมาณน้ำล้างระบบ (B) และอุณหภูมิอากาศร้อน (C) ที่เหมาะสมเพื่อได้ผลิตภาพที่สูงที่สุด ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 โดยกำหนดค่าวัตถุประสงค์ที่ต้องการในระดับของปัจจัยที่ให้ค่าผลิตภาพสูงที่สุด (Maximize) ผู้วิจัยได้กำหนดน้ำหนัก (Weight) เท่ากับ 10 เนื่องจากว่า ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญของเป้าหมายมากกว่าเขต ซึ่งเป้าหมาย (Target) กำหนดไว้ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ และค่าที่ต่ำสุด (Lower) ที่ยอมรับได้ไว้ที่ 27 เปอร์เซ็นต์

Response Optimization: %Productivity

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
%Productivity	Maximum	27	30		10	1

Solution

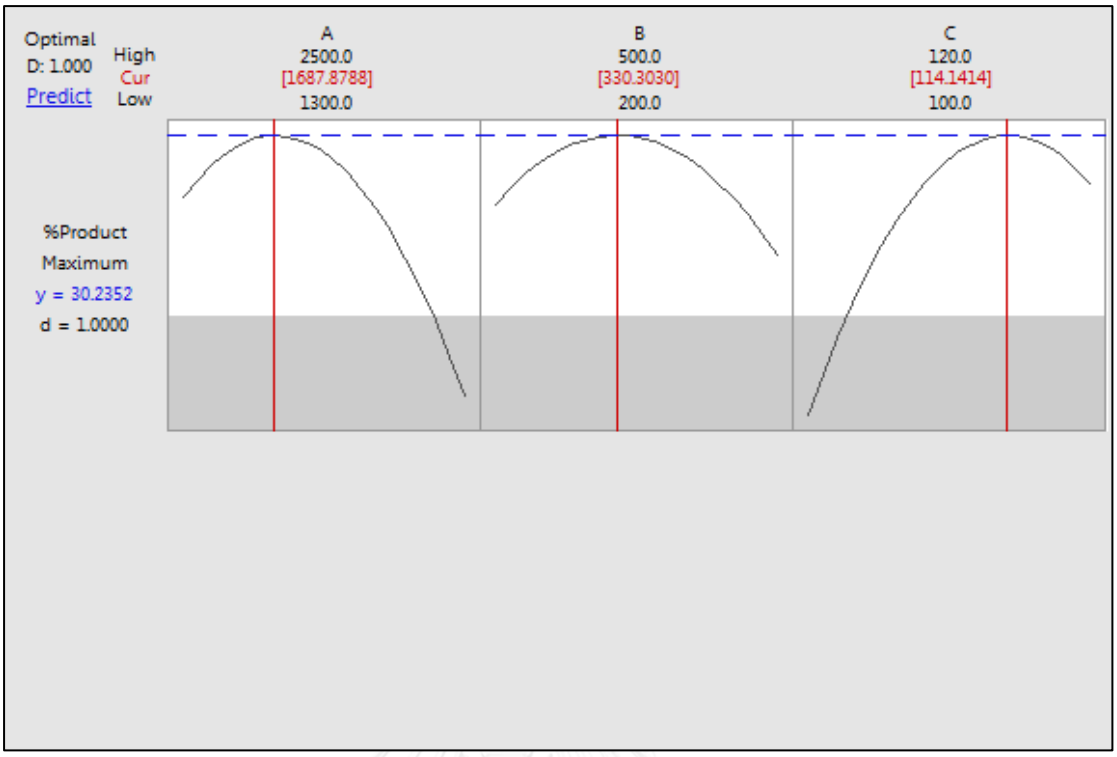
Solution	A	B	C	%Productivity Fit	Composite Desirability
1	1687.88	330.303	114.141	30.2352	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
A	1687.88
B	330.303
C	114.141

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
%Productivity	30.235	0.254	(29.650, 30.820)	(28.986, 31.484)

รูปที่ 5.13 ผลลัพธ์การหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพ



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าผลิตภาพที่สูงสุด

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 5.13 และ 5.14 พบว่า ได้ค่าผลิตภาพเท่ากับ 30.2352 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความพึงพอใจรวมของผลลัพธ์ (Composite Desirability) เท่ากับ 1 นั่นหมายความว่า ค่าที่ได้จากโปรแกรมมินิแทปให้ผลลัพธ์เกินเป้าหมายที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยได้ปรับตั้งค่าที่เหมาะสมใหม่เพราะเครื่องจักรในโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถปรับค่าให้อยู่ในรูปทศนิยมได้ จึงสามารถสรุปได้ในตารางที่ 5.8 ดังนี้

ตารางที่ 5.8 ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง

ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าปรับตั้ง	ค่าที่ปรับตั้งจริง
ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน	A	กิโลกรัม	1687.88	1688
ปริมาณน้ำล้างระบบ	B	กิโลกรัม	330.30	330
อุณหภูมิอากาศร้อน	C	เซลเซียส	114.14	114

จากตารางที่ 5.7 ได้ค่าการตั้งค่าเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าผลิตภาพสูงสุด คือ น้ำล้างเมมเบรน 1688 กิโลกรัม น้ำล้างระบบ 330 กิโลกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อน 114 องศาเซลเซียส

5.5 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการผลิตสีย้อมผ้าประเภทดีดายเพื่อทำให้ค่าผลิตภาพมากขึ้นจะปรับปรุงจากการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 5 คือ จำนวนหัวฉีดและขนาดหัวฉีด ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อน โดยวิธีการออกแบบการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่าและพื้นผิวผลตอบสนองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมก่อนเพื่อนำขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมไปใช้กับการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพที่เหมาะสมต่อไปซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนย่อยของการออกแบบการทดลองได้ดังนี้

5.5.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า

ในการออกแบบการทดลองแบบนี้จะทำการหาค่าที่เหมาะสมของหัวฉีดร่วมกับจำนวนหัวฉีดที่ทำให้ผลิตภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถหาขนาดหัวและจำนวนหัวฉีดมีผลต่อผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนและยังหาความแตกต่างของขนาดหัวฉีดแต่ละระดับโดยใช้วิธีของ Turkey ซึ่งระดับการทดลองที่ใช้คือ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร 2.75 มิลลิเมตร และ 2.3 มิลลิเมตร 2 หัว โดยกำหนดให้ค่าปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 2500 กิโลกรัม ปริมาณน้ำล้างระบบ 500 กิโลกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อน 100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงหาขนาดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจากโปรแกรมมินิแทปด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ซึ่งผลจากโปรแกรมมินิแทปได้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 9 แล้วจึงทำการทดลองทั้งหมด 4 ระดับ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ขนาดของหัวฉีดมีผลต่อผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นหมายความว่า การเพิ่มขนาดหัวฉีดทำให้ผลิตภาพของสีเพิ่มมากขึ้น และผลจากการเปรียบเทียบเชิงซ้อน การเปรียบเทียบเชิงซ้อนพบว่า ขนาดหัวฉีดมีผลต่อค่าผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อขนาดหัวฉีดใหญ่ขึ้นจะได้ผลิตภาพมากขึ้น โดยหัวฉีดขนาด 2.75 มิลลิเมตร มีค่าผลิตภาพมากที่สุดคือ 23.98 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องอุณหภูมิท่อนำเข้าไม่ให้เกิน 200 องศาเซลเซียส จึงควรใช้หัวฉีดขนาด 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งให้ค่าผลิตภาพ 22.92 เปอร์เซ็นต์ หลังจากที่ได้ขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมแล้วจึงทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองต่อไป

5.5.2 สรุปขั้นตอนการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน

หลังจากที่ได้ขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาทดลองต่อในการหาค่าที่ดีที่สุดแต่ละปัจจัยโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ซึ่งปัจจัยที่จะทำการทดลองมีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อน และทำการหาปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภาพสีดีดายอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลกระทบหลักต่อผลิตภาพอย่างมี

นัยสำคัญ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำล้างเมมเบรนจากระดับต่ำมายังระดับกลาง พบว่ามีค่าผลิตภาพเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าสีที่ติดอยู่ภายในเมมเบรนได้ออกมามากขึ้น ทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำมากขึ้นส่งผลให้ผลิตภาพมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำล้างเมมเบรนในระดับสูงพบว่ามีผลิตภาพลดลงเป็นผลมาจากว่าการเพิ่มปริมาณน้ำเมมเบรนมากเกินไปจะทำให้สีมีน้ำรวมอยู่ในสีมากทำให้สีเจือจางลงส่งผลให้มีปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยลงค่าผลิตภาพจึงต่ำลง ผลกระทบของปริมาณน้ำล้างระบบพบว่า เมื่อเปลี่ยนระดับน้ำล้างระบบจากระดับต่ำมายังระดับกลางมีค่าผลิตภาพเพิ่มขึ้นเพราะว่าเกิดการชะล้างสีที่ค้างอยู่ภายในระบบออกมามากขึ้น ทำให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำมากขึ้นส่งผลให้ค่าผลิตภาพมากขึ้น แต่เมื่อเปลี่ยนปริมาณน้ำล้างระบบจากระดับต่ำไปยังระดับสูงพบว่ามีค่าผลิตภาพลดลงเพราะว่าปริมาณน้ำล้างระบบมากเกินไปทำให้สีเจือจางลงส่งผลให้ปริมาณเนื้อสีในน้ำน้อยลง ทำให้ค่าผลิตภาพลดลงด้วยเช่นกันซึ่งมีแนวโน้มและสาเหตุเช่นเดียวกับน้ำล้างเมมเบรน และผลกระทบของอุณหภูมิอากาศร้อนพบว่า เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศร้อนจากระดับต่ำไปยังระดับกลางพบว่ามีค่าผลิตภาพเพิ่มขึ้นเพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนมีอัตราการระเหยที่สูงขึ้นทำให้สีที่สเปรย์ออกมาเป็นผงสีมากขึ้น และเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศร้อนจากระดับกลางเป็นระดับสูงพบว่ามีค่าผลิตภาพลดลงเนื่องจากว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนที่มากเกินไปจะทำให้ผงสีไหม้และเกิดการสลายตัวเป็นฝุ่นผงมากขึ้น

หลังจากที่ทราบปัจจัยใดมีผลต่อผลิตภาพสีดีดายอย่างมีนัยสำคัญแล้วจึงหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย จากโปรแกรมมินิแทปซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5.1

ซึ่งสมการความสัมพันธ์มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือค่า R-Sq เท่ากับ 98.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถยอมรับสมการได้เนื่องจากว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และสามารถใช้สมการพยากรณ์ได้ต่อไป แล้วจึงทำการหาค่าของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมมินิแทปและได้ค่าการตั้งค่าเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภาพสูงสุด คือ น้ำล้างเมมเบรน 1688 กิโลกรัม น้ำล้างระบบ 330 กิโลกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อน 114 องศาเซลเซียส โดยผู้วิจัยได้ทำการปัดเลขเป็นจำนวนเต็ม เนื่องจากว่าเครื่องจักรไม่สามารถใส่ค่าเป็นตัวเลขทศนิยมได้

หลังจากที่ได้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองแล้วจึงจัดอบรมพนักงานเพื่อให้เข้าใจถึงการปรับตั้งค่าใหม่ของเครื่องจักร และจัดทำคู่มือการปฏิบัติการใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติแล้วจึงทำการตั้งค่ากับเครื่องจักรและควบคุมกระบวนการโดยใช้เครื่องมือทางสถิติต่อไป

บทที่ 6
ขั้นตอนการติดตามและควบคุม

หลังจากที่หาค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนการปรับปรุงแล้วจึงทำขั้นตอนการติดตามและควบคุมประกอบไปด้วยการทดสอบเพื่อยืนยันผลและควบคุมกระบวนการโดยนำค่าที่เหมาะสมจากบทที่ 5 มากำหนดเป็นค่าปัจจัยนำเข้าแล้วจึงสร้างแผนควบคุม (Control Plan) และเลือกแผนภูมิที่เหมาะสมในการติดตามผลการปฏิบัติงาน แล้วจึงจัดทำวิธีการดำเนินงานหลังการปรับปรุงเพื่อทำการตรวจสอบผลิตภาพของสีประเภทดีดาย ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

หลังจากที่ได้ค่าจากขั้นตอนการปรับปรุงแล้วจึงทำการยืนยันผลกับเครื่องจักรจริงเพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่เหมาะสมที่ได้สามารถช่วยปรับปรุงค่าผลิตภาพได้จริง และนำค่าผลิตภาพหลังการปรับปรุงมาเปรียบเทียบกับผลิตภาพก่อนปรับปรุง

6.1.1 การทำการทดลองเพื่อยืนยันผล

ในการทดลองโดยการเตรียมเครื่องจักรจากกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยได้ตรวจสภาพความพร้อมของชิ้นส่วนเครื่องจักรของเครื่องทั้ง 2 กระบวนการ รวมถึงอบรมพนักงานเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับค่าปัจจัยนำเข้าใหม่ จากนั้นจึงเริ่มทำการเก็บข้อมูลยืนยันผลและควบคุมผล ซึ่งมีขั้นตอนการเก็บข้อมูลดังนี้

1. ขั้นแรกทำการเตรียมสีที่ผ่านการสังเคราะห์จากโรงงานสังเคราะห์สีและถ่ายมายังถังในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสเพื่อเข้าสู่กระบวนการ
2. ปรับตั้งค่าปัจจัยนำเข้าของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส โดยตั้งค่าปัจจัยนำเข้าที่ได้จากการทดลองได้แก่ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 1668 กิโลกรัม ปริมาณน้ำล้างระบบ 330 กิโลกรัม แล้วจึงเริ่มทำการเดินเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอย
3. เมื่อสีที่ผ่านจากกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสแล้วจึงนำสีไปเก็บที่ถังพักสีเพื่อทำเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยต่อไป
4. ติดตั้งหัวฉีดขนาด 2.5 มิลลิเมตร เข้ากับเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอย
5. ทำการอุ่นเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเป็นเวลา 30 นาที เพื่อเตรียมความพร้อมของเครื่อง

6. ตั้งค่าปัจจัยนำเข้าความดัน 47 บาร์ อัตราการไหล 1500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และป้อนค่าปัจจัยนำเข้าอุณหภูมิอากาศร้อนจากการทดลองที่ 114 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการเดินเครื่องเดิน โดยอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าไม่สามารถกำหนดค่าเองได้ซึ่งเครื่องจะทำการปรับอัตโนมัติเอง โดยความดันและอัตราการป้อนสารเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าในการสเปรย์สี
7. ทำการเก็บข้อมูลจากผลการทดลองทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อยืนยันผลการทดลอง
8. วิเคราะห์ผลและสรุปผลจากการยืนยันผลการทดลอง และตรวจสอบคุณภาพของสีในขั้นตอนสุดท้าย

6.1.2 ผลการทดลอง

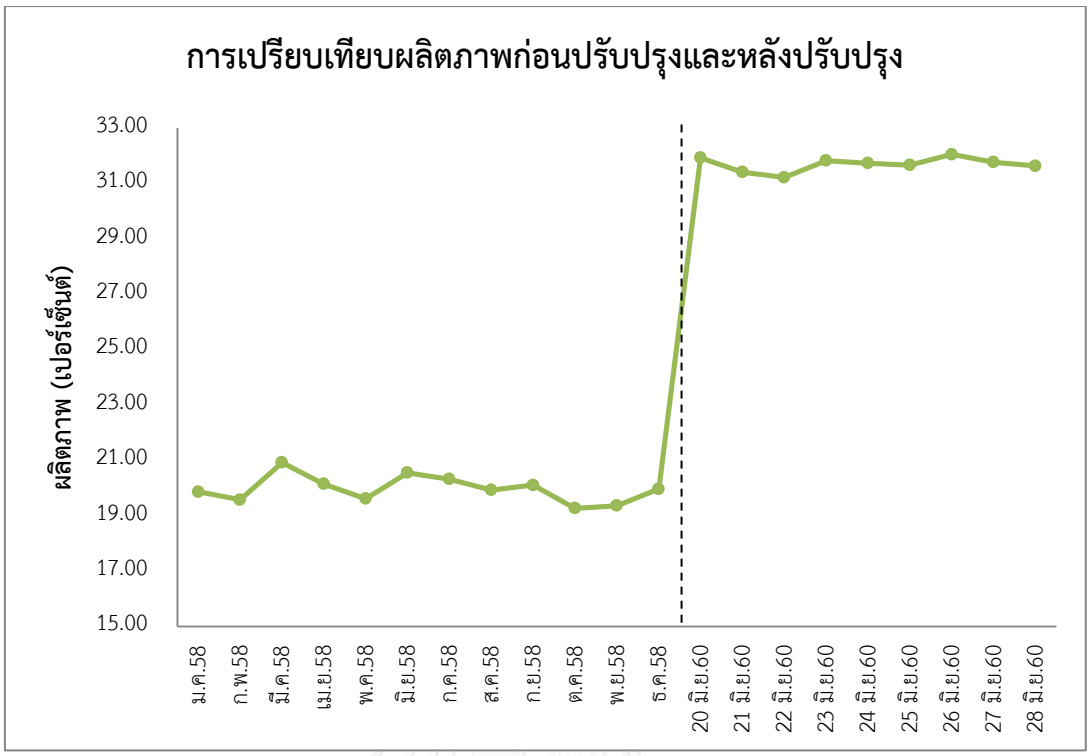
จากการทดลองการยืนยันผลเพื่อทำการเปรียบเทียบผลของปัจจัยนำเข้าก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย โดยจะเปรียบเทียบ 2 ช่วงเวลาคือ ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง โดยมีการกำหนดปัจจัยนำเข้าดังตารางที่ 6.1 และเปรียบเทียบข้อมูลผลิตภาพของสีดีดายก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งก่อนการปรับปรุงใช้ข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ.2558 และช่วงหลังการปรับปรุงใช้ข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ.2560 ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1ระดับของปัจจัยนำเข้าก่อนการทำการปรับปรุง

ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	ค่าปรับตั้งก่อนการปรับปรุง	ค่าปรับตั้งหลังการปรับปรุง	หน่วย
ขนาดหัวฉีด	-	2.3	2.5	มิลลิเมตร
ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน	A	1687.88	1688	กิโลกรัม
ปริมาณน้ำล้างระบบ	B	330.30	330	กิโลกรัม
อุณหภูมิอากาศร้อน	C	114.14	114	องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบผลิตภาพก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

ระยะ	เดือน	วัตถุดิบ (กิโลกรัม)	ผลผลิต (กิโลกรัม)	ผลิตภาพ	ผลิตภาพ (เปอร์เซ็นต์)	ผลิตภาพเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)
ก่อนปรับปรุง	ม.ค.58	9120	1812	0.1987	19.87	19.97
	ก.พ.58	10435	2043	0.1958	19.58	
	มี.ค.58	9043	1892	0.2092	20.92	
	เม.ย.58	11231	2263	0.2015	20.15	
	พ.ค.58	10562	2072	0.1962	19.62	
	มิ.ย.58	9252	1902	0.2056	20.56	
	ก.ค.58	9245	1879	0.2032	20.32	
	ส.ค.58	9146	1823	0.1993	19.93	
	ก.ย.58	10643	2140	0.2011	20.11	
	ต.ค.58	10503	2024	0.1927	19.27	
	พ.ย.58	11654	2257	0.1937	19.37	
	ธ.ค.58	11232	2243	0.1997	19.97	
หลังปรับปรุง	20 มิ.ย.60	9245	2797	0.3025	30.25	31.69
	21 มิ.ย.60	10356	3133	0.3025	30.25	
	22 มิ.ย.60	10244	3098	0.3024	30.24	
	23 มิ.ย.60	9245	2952	0.3193	31.93	
	24 มิ.ย.60	10356	3253	0.3141	31.41	
	25 มิ.ย.60	10244	3198	0.3122	31.22	
	26 มิ.ย.60	10532	3352	0.3183	31.83	
	27 มิ.ย.60	10245	3251	0.3173	31.73	
	28 มิ.ย.60	10002	3167	0.3166	31.66	
	20 มิ.ย.60	10155	3255	0.3205	32.05	



รูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบผลิตภาพก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

จากตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.1 พบว่า ค่าผลิตภาพของสีประเภทดีดายเพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต จากก่อนการปรับปรุงกระบวนการที่มีค่าเฉลี่ยในช่วงเดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2558 ที่ 19.97 เปอร์เซ็นต์ หลังการปรับปรุงมีค่าผลิตภาพเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 31.69 เปอร์เซ็นต์ ภายในช่วงวันที่ 20 มิถุนายน ถึง 28 มิถุนายน พ.ศ.2560 ซึ่งผลิตภาพหลังการปรับปรุงเพิ่มขึ้นจากก่อนการปรับปรุง 58.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของการปรับปรุงที่ต้องการเพิ่มผลิตภาพขึ้นอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีสีดีดายที่ออกจากกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยมากขึ้น และไม่ต้องผลิตซ้ำเพื่อให้ได้สีตามปริมาณที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ระยะเวลาการผลิตน้อยลงและส่งมอบสินค้าให้ทันตามความต้องการของลูกค้า

6.1.3 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณค่าใช้จ่ายที่ลดได้หลังการปรับปรุงซึ่งในการผลิตสีประเภทดีดายก่อนการปรับปรุงใช้เวลาในการผลิตประมาณรอบการผลิตละ 32 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายการผลิตคิดเป็นมูลค่า 14,648 บาทต่อชั่วโมง เฉลี่ยแล้วแต่ละรอบการผลิตจะมีค่าใช้จ่าย 32×14,648 = 468,736 บาทต่อรอบการผลิต ซึ่งค่าใช่จ่ายนี้เป็นค่าใช้จ่ายในเรื่อง ค่าน้ำ ค่าไฟและค่าแก๊ส หลังจากทำการปรับปรุงสามารถลดเวลาการผลิตในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเหลือรอบการผลิตละ

25 ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นต้นทุนการผลิต 25×14,648 = 366,200 บาทต่อรอบการผลิต ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายการผลิตได้ 102,536 บาทต่อรอบการผลิต

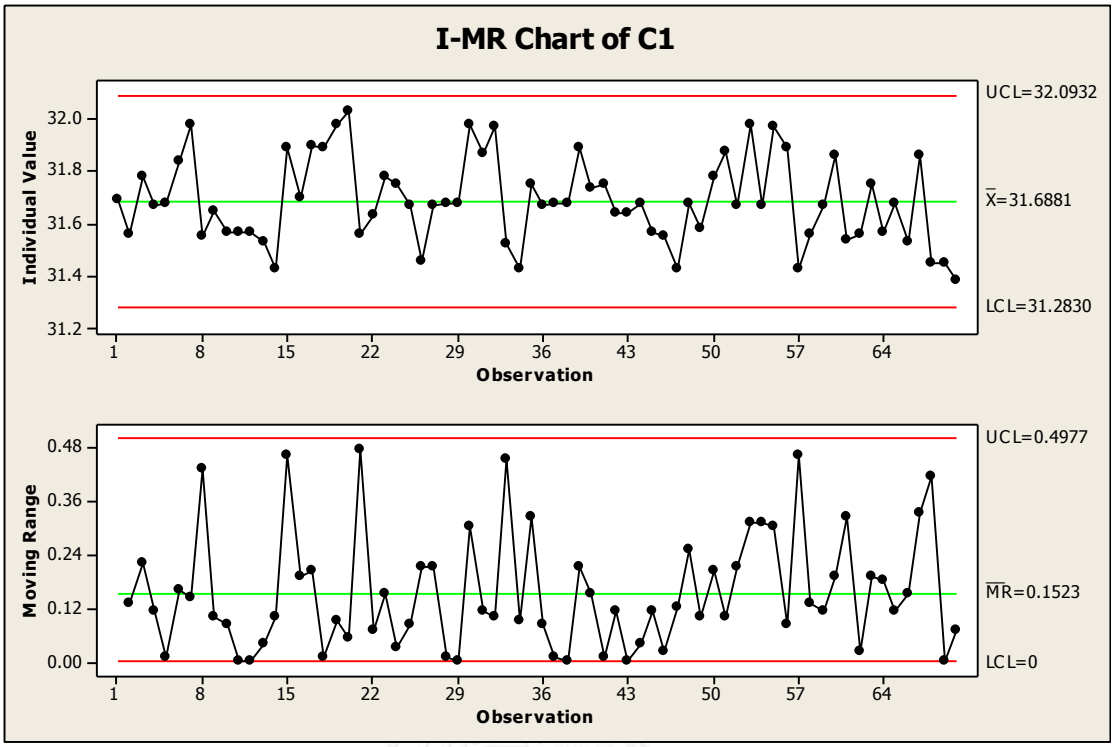
ภายในปี พ.ศ.2560 มียอดการผลิตเท่ากับ 93 รอบการผลิต ดังนั้นจึงคาดการณ์ได้ว่าผลการปรับปรุงนี้จะสามารถลดค่าใช้จ่ายการผลิตลงได้ 93×102,536 = 9,535,848 บาทต่อปี

6.2 การตรวจติดตามและควบคุม

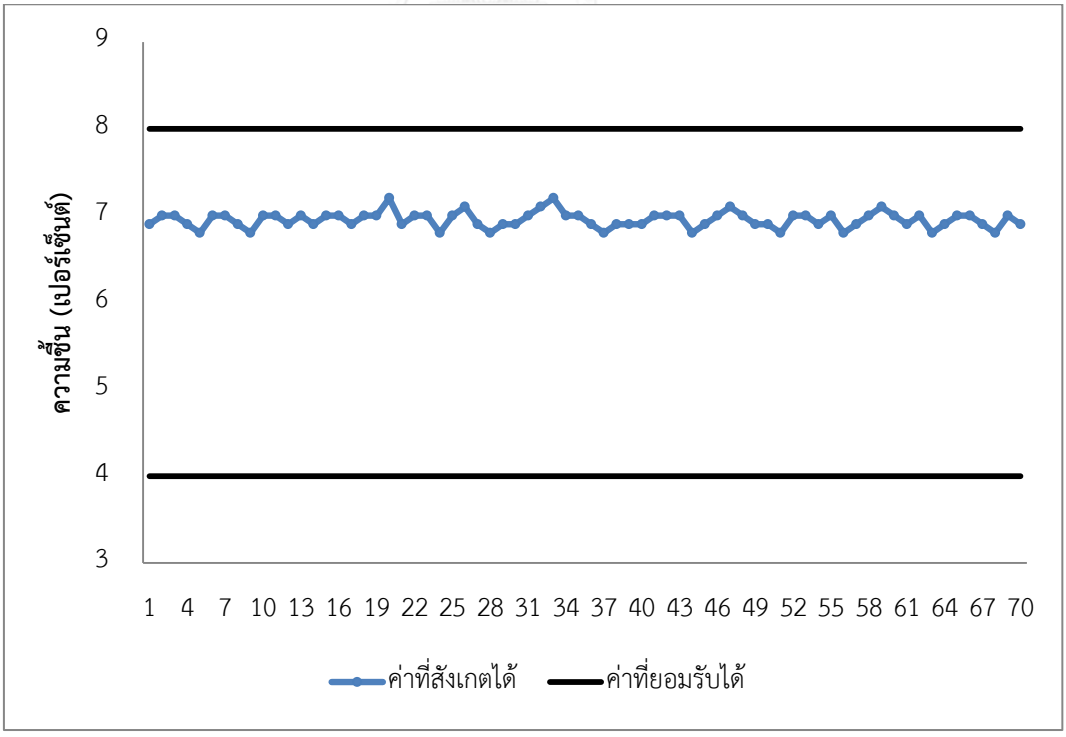
หลังจากการปรับปรุงกระบวนการแล้วจะต้องทำการควบคุมการผลิตสีให้ค่าผลิตภาพคงที่และต้องควบคุมคุณภาพของสีให้อยู่ในข้อกำหนดที่โรงงานยอมรับ ผู้วิจัยจึงได้สร้างแผนควบคุม (Control Plan) เพื่อใช้ในการควบคุมค่าผลิตภาพ ตัวชี้วัดด้านคุณภาพ และปัจจัยที่มีผลต่อค่าเหล่านั้น โดยตัวชี้วัดทางด้านคุณภาพของทางโรงงานได้แก่ ความชื้นซึ่งมีข้อกำหนดในช่วง 4 - 8 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นรวม 0.4 - 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มสีมากกว่า 125 ออร์กู๊ด (Argus) และขนาดอนุภาค 50 - 100 ไมครอน ส่วนปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าผลิตภาพที่ต้องควบคุมได้แก่ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อน

ผู้วิจัยได้ใช้แผนภูมิควบคุม I-MR ในการติดตามค่าผลิตภาพเพื่อจะได้ทราบว่าค่าผลิตภาพมีความผิดปกติจากเดิมหรือไม่และทำให้สามารถแก้ไขให้กระบวนการเข้าสู่สภาวะปกติได้อย่างทันท่วงที ซึ่งจะใช้แผนภูมิควบคุม I-MR ในการควบคุมเนื่องจากว่า กลุ่มตัวอย่าง (Subgroup) คือชั่วโมงใด ๆ และค่าที่ติดตามคือ ผลิตภาพ ซึ่งมีค่าเพียงค่าเดียวต่อรอบการผลิต ดังนั้น จึงใช้แผนภูมิควบคุม I-MR ดังรูปที่ 6.2 ส่วนตัวชี้วัดทางด้านคุณภาพได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่นรวม ความเข้มสีและขนาดอนุภาค ซึ่งจะใช้กราฟในการควบคุมให้ค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ดังแสดงในรูปที่ 6.3 - 6.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวชี้วัดทางด้านคุณภาพทั้ง 4 ตัวแปร อยู่ในข้อกำหนดของทางโรงงาน ผู้วิจัยได้ปรับปรุงเอกสารวิธีการปฏิบัติงานตามวิธีการปรับปรุงที่ได้พัฒนาขึ้นและจัดทำใบตรวจสอบ (Check Sheet) เพื่อตรวจสอบและควบคุมตัวแปรตอบสนองทางด้านคุณภาพดังแสดงในตารางที่ 6.3 - 6.6 และจัดอบรมเพื่อให้พนักงานเข้าใจค่าปรับตั้งใหม่ และในส่วนค่าปรับตั้งใหม่ของปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อน ได้มีเซนเซอร์ปรับอัตโนมัติเพื่อให้ค่าอยู่ที่ระดับเหมาะสมตลอดเวลา

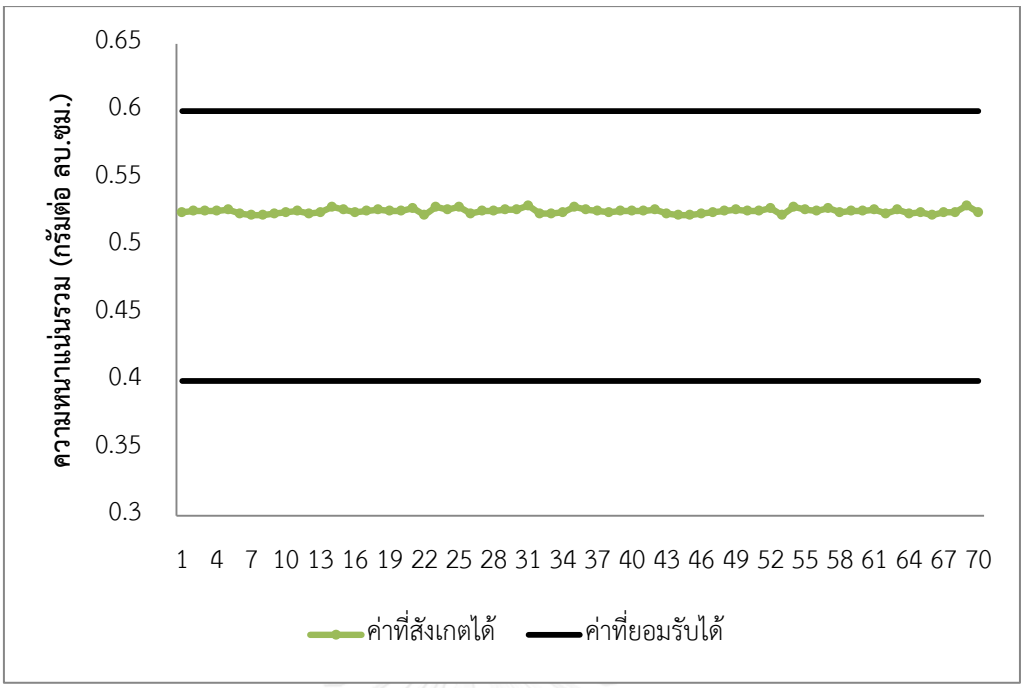
ผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่า การใช้ขนาดหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 1688 กิโลกรัม ปริมาณน้ำล้างระบบ 330 กิโลกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อน 114 องศาเซลเซียส นอกจากให้ค่าผลิตภาพที่สูงขึ้นแล้วปัจจัยทางด้านคุณภาพยังอยู่ในข้อกำหนดของโรงงาน จึงสามารถใช้ค่าที่ปรับปรุงใหม่นี้ในการผลิตต่อไปเพื่อเพิ่มผลิตภาพได้



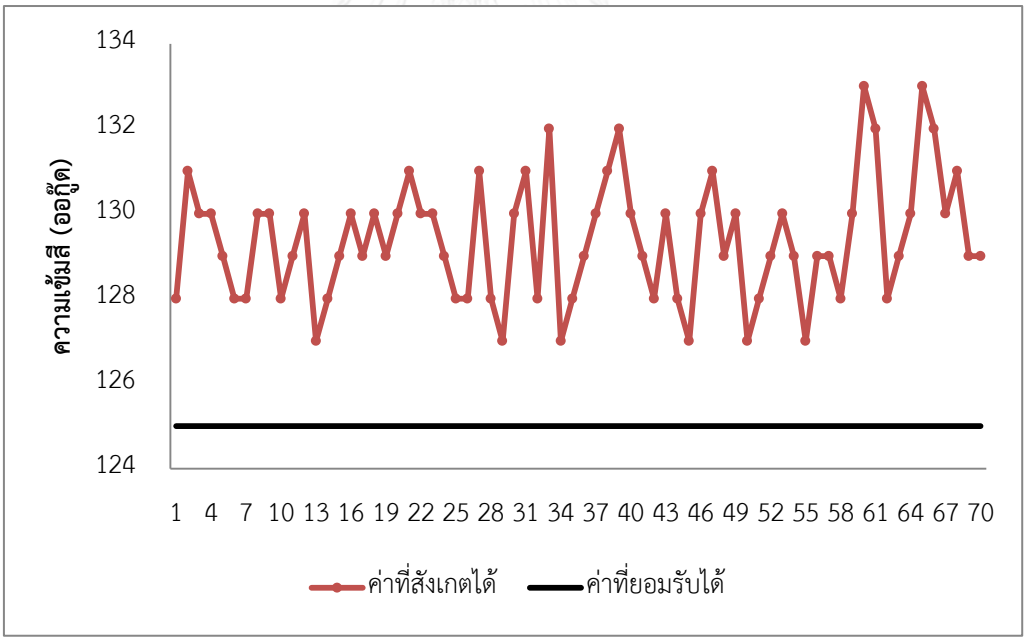
รูปที่ 6.2 แผนภูมิควบคุมค่าผลิตภาพของสีดีดาย



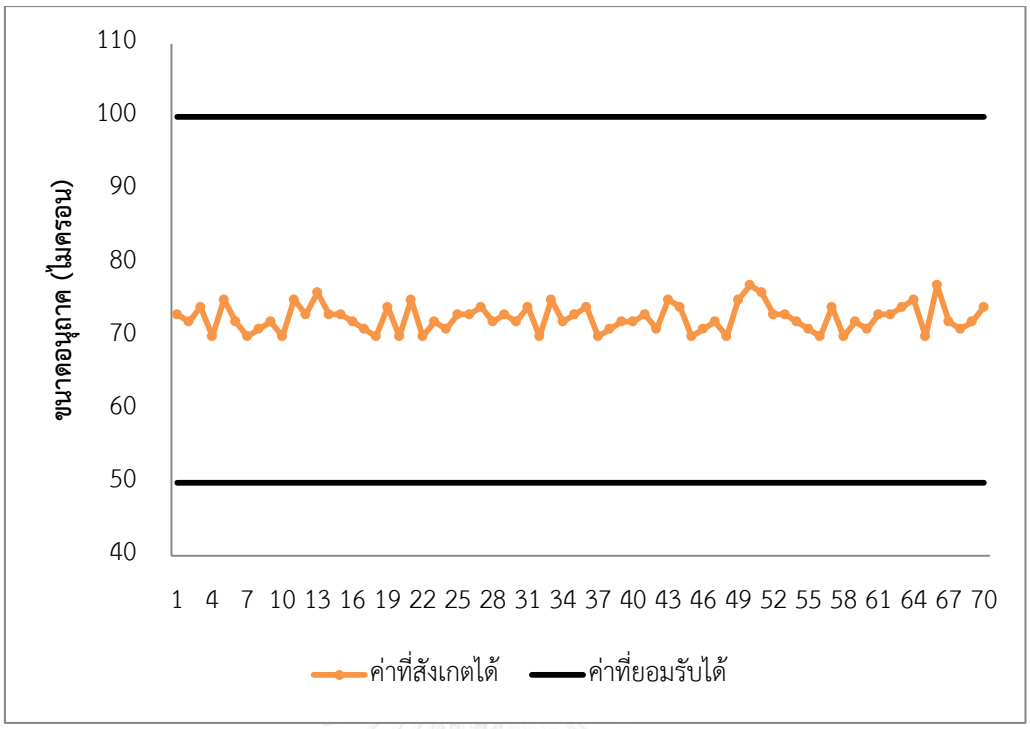
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงค่าความชื้นของสีหลังการปรับปรุง



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวมของสีหลังการปรับปรุง



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงค่าความเข้มสีของสีหลังการปรับปรุง



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงค่าขนาดอนุภาคของสีหลังการปรับปรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.4 แผนควบคุมปัจจัยนำเข้าของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฟอย

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	ค่าปรับตั้ง	หน่วย	เครื่องมือ	ความถี่	ผู้รับผิดชอบ	เอกสาร	การแก้ปัญหา
1	น้ำล้างเมมเบรน	1688	กิโลกรัม	เซนเซอร์	ทุก 1 ชั่วโมง	พนักงานประจำเครื่อง	แบบบันทึกปัจจัยนำเข้า	แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการแก้ไขการตั้งค่าตามที่กำหนด
2	น้ำล้างระบบ	330	กิโลกรัม					
3	อุณหภูมิอากาศร้อน	114	องศาเซลเซียส					

ตารางที่ 6.3 แผนควบคุมปัจจัยตัวแปรตอบสนองของกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฟอย

ลำดับที่	ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่ยอมรับ	หน่วย	เครื่องมือ	ความถี่	ผู้รับผิดชอบ	เอกสาร	การแก้ปัญหา
1	ความชื้น	4 - 8	เปอร์เซ็นต์	กราฟ	ทุก 1 ชั่วโมง	พนักงานประจำเครื่อง	แบบบันทึกตัวแปรตอบสนอง	แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการตรวจสอบปัญหา
2	ความหนาแน่นรวม	0.4 – 0.6	กรัม/ลบ.ซม.					
3	ความเข้มสี	มากกว่า 125	ออกู๊ด					
4	ขนาดอนุภาค	50 – 100	ไมครอน					
5	ผลิตภาพ	มากกว่า 30	เปอร์เซ็นต์	แผนภูมิควบคุม I-MR	ทุก 1 ชั่วโมง	พนักงานประจำเครื่อง	แบบบันทึกตัวแปรตอบสนอง	แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการตรวจสอบปัญหา

ตารางที่ 6.5 วิธีการปฏิบัติงานของการผลิตสีประเภทดีดายโรงงานผลิตสีสำเร็จรูป

Finishing Plant วิธีการปฏิบัติงาน สีประเภทดีดาย		
ขั้นตอน	**รายละเอียดการปฏิบัติงาน**	**หมายเหตุ**
1	เตรียมความพร้อมก่อนการปฏิบัติงานโดยสวมอุปกรณ์ป้องกันภัย (PPE) ตลอดการทำงาน	-หมวก รองเท้านิรภัย -ถุงมือ-แว่นตา หน้ากากอนามัย
กระบวนการรีเวิร์ออสโมซิส		
2	ก่อนเดินเครื่องรีเวิร์สออสโมซิสให้ทำการตรวจสภาพความพร้อมของเมมเบรนโดยตรวจสอบความสะอาดของเมมเบรน	-ถ้าหากมีสีติดค้างในเมมเบรนให้ล้างด้วยน้ำจนกว่าจะไม่มีสีติด
3	ทำการเตรียมความพร้อมของเครื่องโดยการอุ่นเมมเบรน 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	
4	ตั้งค่าจำนวนรอบการกำจัดเกลือ 5 ครั้ง น้ำอ่อน 10 ลูกบาศก์เมตร น้ำดีมิน 10 ลูกบาศก์เมตร น้ำล้างเมมเบรน 1688 กิโลกรัม จุดยุติ 13000 กิโลกรัม แล้วจึงทำการเดินเครื่องรีเวิร์สออสโมซิสรีเวิร์สออสโมซิส	-ในครั้งแรกของการกำจัดเกลือให้ใช้น้ำอ่อน และครั้งถัดไปจะใช้น้ำดีมิน
5	กรองสิ่งสกปรกและตรวจเช็คสิ่งสกปรก	-มีค่าคลอไรด์ไม่เกิน 7 ppm -ความเข้มสีมากกว่า 134 ออร์กู๊ด
6	ตั้งค่าจำนวนรอบการกำจัดเกลือ 2 ครั้ง น้ำดีมิน 10 ลูกบาศก์เมตร น้ำล้างเมมเบรน 1688 กิโลกรัม น้ำล้างระบบ 330 กิโลกรัม	-นำไปเก็บไว้ในถังพักสี B01-R01
กระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย		
7	ติดตั้งหัวฉีดขนาด 2.5 มิลลิเมตร	
8	อุ่นเครื่องทำให้แห้งแบบพ่นฝอยเป็นเวลา 30 นาที	
9	ตั้งค่าความดัน 47 บาร์ อัตราการไหล 750 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และป้อนค่าปัจจัยนำเข้าอุณหภูมิอากาศร้อนจากการทดลองที่ 114 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการเดินเครื่อง	-อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส
10	ตรวจเช็คคุณภาพของสี	-ความชื้น -ความเข้มสี -อนุภาคของสี -ความหนาแน่นรวม
11	บรรจุภัณฑ์ถุงละ 25 กิโลกรัม	

ตารางที่ 6.6 ใบตรวจสอบตัวแปรด้านคุณภาพ

แบบฟอร์มการเช็คพารามิเตอร์

เครื่อง..... **สี**.....

วันที่.....

พารามิเตอร์	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	หมายเหตุ
วัตถุดิบ (kg)										
ผลผลิต (kg)										
ความชื้น (%)										
ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)										
ขนาดอนุภาคสี (μ)										
ความเข้มสี (Argus)										

ผู้รับผิดชอบ กะ

ผู้รับผิดชอบ กะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.3 สรุปขั้นตอนการติดตามและควบคุม

ในขั้นตอนการติดตามและควบคุมเป็นการนำค่าปัจจัยนำเข้าใหม่ที่ได้จากบทที่ 5 มาติดตามและควบคุมเพื่อสังเกตสิ่งผิดปกติภายในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยโดยผู้วิจัยได้สร้างแผนควบคุมกำหนดตัวที่ต้องควบคุมและวิธีการควบคุมในกระบวนการและใช้แผนภูมิควบคุมในการติดตามค่าผลิตภาพเพื่อควบคุมตัวแปรตอบสนองและปัจจัยในการป้องกันสิ่งผิดปกติเพื่อจะได้แก้ไขสิ่งผิดปกติได้ทันท่วงที นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้จัดทำวิธีการดำเนินการใหม่เพื่อรองรับค่าปรับตั้งใหม่และจัดทำใบตรวจสอบเพื่อตรวจสอบและควบคุมตัวแปรตอบสนองทางด้านคุณภาพ

จากการรวบรวมข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ.2558 พบว่ามีค่าผลิตภาพของสีย้อมผ้าประเภทดีดายเฉลี่ย 19.97 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากการทำการทดลองและนำค่าปัจจัยใหม่มาใช้ในกระบวนการจริงในช่วงวันที่ 20 มิถุนายน ถึง 28 มิถุนายน พ.ศ.2560 พบว่า มีค่าผลิตภาพเฉลี่ย 31.69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 58.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่าทำให้ใช้ค่าใช้จ่ายการผลิตลดลง 102,536 บาทต่อรอบการผลิต และในปี พ.ศ.2560 มียอดการผลิตเท่ากับ 93 รอบการผลิต ดังนั้นคาดว่าสามารถค่าใช้จ่ายการผลิตลดลงได้ 9,535,848 บาทต่อปี

นอกจากนี้หลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิตไม่พบสิ่งผิดปกติบนแผนภูมิควบคุมและกราฟทำให้คุณภาพของสีประเภทดีดายผ่านข้อกำหนดตามที่โรงงานได้ตั้งไว้แล้วจึงทำให้สามารถส่งมอบสีตามที่ลูกค้าต้องการได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 7
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิตสีย้อมผ้าประเภทดีดายในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยให้มีค่าผลิตภาพเพิ่มมากขึ้นโดยใช้การปรับปรุงตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา ซึ่งก่อนปรับปรุงกระบวนการมีค่าผลิตภาพเฉลี่ย 19.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสีประเภทอื่น ๆ ส่งผลให้มีรอบการผลิตที่นานกว่าสีประเภทอื่น ๆ จึงทำให้มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าสีประเภทอื่น ๆ ผู้วิจียได้สรุปผลงานวิจัยตามขั้นตอนได้ดังนี้

7.1 บทสรุปขั้นตอนการนิยามปัญหา

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานกรณีศึกษาโดยการระบุปัญหา เป้าหมายและขอบเขตของปัญหา รวมถึงพิจารณาขั้นตอนการผลิตของสีย้อมผ้าในช่วงเดือนมกราคม ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ.2558 พบว่า สีย้อมผ้าที่ผลิตมีทั้งหมด 5 ประเภท ได้แก่ ดีดาย นอนเอฟดาย เอดายเอฟดาย และแอลดาย พบว่าสีประเภทดีดายมีผลิตภาพเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ 19.97 เปอร์เซ็นต์ และยังใช้เวลาในการผลิตนานที่สุดถึง 32 ชั่วโมงต่อรอบการผลิต คิดเป็นค่าใช้จ่ายการผลิตต่อรอบการผลิตอยู่ที่ 468,736 บาท และคิดเป็นค่าใช้จ่ายการผลิตในปี พ.ศ.2558 38,145,354 บาท ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกสีประเภทดีดายในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและทำการกำหนดเป้าหมาย คือ การเพิ่มผลิตภาพของสีประเภทดีดาย 50 เปอร์เซ็นต์ โดยศึกษาในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย เท่านั้น ไม่รวมถึงกระบวนการสังเคราะห์สีและกระบวนการบรรจุภัณฑ์

7.2 บทสรุปขั้นตอนการวัดและกำหนดสาเหตุของปัญหา

ก่อนจะทำการทดลองต้องผ่านการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อให้ระบบการวัดมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากว่า การวัดของกระบวนรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยใช้ระบบเซนเซอร์ในการตรวจวัดทั้งหมดและได้ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานตามระยะเวลาที่กำหนดทุกปี ซึ่งการตรวจเช็คในระยะเวลาที่กำหนดอย่างสม่ำเสมอแล้วทำให้ระบบการวัดของทางโรงงานกรณีศึกษามีความน่าเชื่อถือในการวัด เมื่อทดสอบระบบการวัดให้มีความน่าเชื่อถือแล้วจึงทำการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุของปัญหาต่อไป

ในขั้นตอนการกำหนดสาเหตุของปัญหาในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยโดยการระดมสมองกับสมาชิกในทีม ซึ่งพบว่าปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อผลิตภาพ

สามารถแบ่งออกได้ 4 หมวดหมู่ ได้แก่ พนักงาน วิธีการ เครื่องจักร และวัตถุดิบ จากนั้นจึงพิจารณาปัจจัยของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้แผนผังแสดงความสัมพันธ์และแผนผังสาเหตุและผล และจากนั้นจัดลำดับความสำคัญโดยใช้การให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุ และหลังจากนั้นจึงคัดเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบมากโดยใช้กราฟพาเรโต ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากมีทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของฮากาศร้อน จำนวนหัวฉีดและขนาดหัวฉีด ปริมาณคอนเซนเทรท ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ และปริมาณคอนเซนเทรต แต่ผู้วิจัยและทีมได้พบข้อจำกัดของปัจจัยปริมาณคอนเซนเทรต จึงเหลือปัจจัยเพียง 5 ปัจจัยในการศึกษาต่อโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองต่อไป

7.3 บทสรุปขั้นตอนการปรับปรุง

ปัจจัยที่นำมาออกแบบการทดลองได้แก่ จำนวนหัวฉีดและขนาดหัวฉีด ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อน ซึ่งปัจจัยจำนวนหัวฉีดจะศึกษาร่วมกับขนาดหัวฉีด แต่เนื่องจากว่า ปัจจัยขนาดหัวฉีดมีระยะห่างของระดับที่ไม่เท่ากันทำให้ระดับที่จะทำการทดลองได้ไม่เป็นไปตามโครงสร้างของระดับของวิธีการพื้นผิวตอบ ทำให้ไม่สามารถทดลองร่วมกับอีก 3 ปัจจัยได้ จึงต้องทำการทดลองแยก โดยใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า โดยมีระดับการทดลองอยู่ 4 ระดับ คือ ขนาดหัวฉีด 2.3 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร 2.75 มิลลิเมตร และ 2.3 มิลลิเมตร 2 หัว โดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 2,500 กิโลกรัม และปริมาณน้ำล้างระบบ 500 กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าปัจจุบันที่ใช้ในกระบวนการผลิตสีและมีจำนวนการทดลองซ้ำ 9 ครั้ง ซึ่งได้ผลการทดลอง คือ ขนาดหัวฉีดมีผลต่อผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 และผลจากการเปรียบเทียบเชิงซ้อน การเปรียบเทียบเชิงซ้อนพบว่า โดยเมื่อขนาดหัวฉีดใหญ่ขึ้นจะได้ผลิตภาพมากขึ้น โดยหัวฉีดขนาด 2.75 มิลลิเมตร มีค่าผลิตภาพมากที่สุดคือ 23.98 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องอุณหภูมิท่อนำเข้าไม่ให้เกิน 200 องศาเซลเซียส จึงควรใช้หัวฉีดขนาด 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งให้ค่าผลิตภาพ 22.92 เปอร์เซ็นต์ หลังจากที่ได้ขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมแล้วจึงทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองต่อไป

หลังจากที่ได้ขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาทดลองต่อในการหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองแบบบอกซ์-เบห์นเคน ซึ่งปัจจัยที่จะทำการทดลองมีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน ปริมาณน้ำล้างระบบ และอุณหภูมิอากาศร้อน แล้วจึงทำการหาปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภาพสีดีดายอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลกระทบหลักต่อผลิตภาพอย่างมีนัยสำคัญและทำการหาสมการความสัมพันธ์ซึ่งได้ดังสมการที่ 5.1 และได้ค่าปัจจัยนำเข้าที่

เหมาะสมคือ ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 1688 กิโลกรัม ปริมาณน้ำล้างระบบ 330 กิโลกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อน 114 องศาเซลเซียส

7.4 บทสรุปขั้นตอนการติดตามและควบคุม

ในขั้นตอนการติดตามและควบคุมเป็นการทดสอบยืนผลของระดับปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ ขนาดหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 1688 กิโลกรัม ปริมาณน้ำล้างระบบ 330 กิโลกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อน 114 องาศาเซลเซียส แล้วจึงสร้างคู่มือปฏิบัติงานและอบรมพนักงานให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการตั้งค่าปัจจัยนำเข้าใหม่รวมถึงแผนควบคุมของปัจจัยและตัวแปรตอบสนองเพื่อตรวจตามสิ่งผิดปกติทุกชั่วโมง ซึ่งผลจากการยืนยันผลพบว่า สีดายมีผลิตภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 19.97 เปอร์เซ็นต์ เป็น 31.69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากก่อนการปรับปรุง 58.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหลังจากการปรับปรุงกระบวนการมีเวลาการผลิตลดลงจาก 32 ชั่วโมง เป็น 25 ชั่วโมง โดยมีต้นทุนการผลิตชั่วโมงละ 14,648 บาท ทำให้ลดต้นทุนการผลิต 366,200 บาทต่อรอบการผลิต ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 9,535,848 บาทต่อปี นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้ใช้แผนภูมิควบคุม I-MR เพื่อติดตามสิ่งผิดปกติของค่าผลิตภาพและกราฟในการติดตามตัวชี้วัดด้านคุณภาพได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่นรวม ความเข้มสี และขนาดอนุภาคให้อยู่ในค่าที่ยอมรับได้ที่โรงงานกำหนดไว้ ซึ่งหลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิตพบว่า ไม่พบสิ่งผิดปกติบนแผนภูมิควบคุม I-MR และกราฟ ซึ่งทำให้ค่าผลิตภาพและคุณภาพของสีประเภทดีดายผ่านข้อกำหนดตามที่โรงงานได้ตั้งไว้แล้วจึงทำให้สามารถส่งมอบสีตามที่ลูกค้าได้และยังสามารถนำค่าปัจจัยนำเข้าใหม่ไปใช้ในครั้งถัดไปได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.5 ข้อจำกัดของงานวิจัย

ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยนี้จะใช้ได้เฉพาะสีดีดายเท่านั้น

7.6 ข้อเสนอแนะ

1. จากงานวิจัยนี้พบว่า สามารถนำขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพไปประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงกระบวนการผลิตของสีประเภทอื่น ๆ ได้ต่อไป
2. ควรศึกษาปัจจัยในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิของเมมเบรน ความดันเมมเบรน เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี *2557*. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2557.
2. ธัศภรณ์ณณก จันทระ. อนาคตอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย. กรุงเทพมหานคร : สำนักเศรษฐกิจไทย, 2555.
3. วันชัย ริจิรวนิช. การศึกษาการทำงาน หลักการและกรณีศึกษา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
4. Harry, M.J. Six Sigma : A Braekthrough Strategy for Profitability. Quality Progress, 1998.
5. สมยศ วงษ์น้อย. การปรับปรุงคุณภาพกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยเทคนิคซิกส์ ซิกมา : กรณีศึกษา บริษัท โคคูโย-ไอเค (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาควิขาการจัดการวิศวกรรม คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
6. พโยม เหลือแก้ว. การปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการเชื่อมลวดด้วยเทคนิคซิกส์ ซิกมา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาควิขาการจัดการวิศวกรรม คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
7. จักริน ยิ้มย่อง. การปรับปรุงการผลิตเพื่อลดของเสียโดยใช้หลักการของซิกซ์ ซิกมา : กรณีศึกษา บริษัท เล็นตัส เทคโนโลยีส์ (ไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาควิขาการจัดการวิศวกรรม คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
8. Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. ed. 8. Arizona State University : John Wiley & Sons, Inc, 2013.
9. ผศ.ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, เอกสารประกอบการเรียนเรื่อง การปรับปรุงคุณภาพ. 2559.
10. Box, G.E.P. and Draper, N.R. Empirical Model Building and Response Surfaces. New York : John Wiley & Sons, Inc Sons, 1987.
11. Smith, A.T. Comparison of information-yield from different experimental designs used in algal toxicity testing of chemical mixtures. Environmental Pollution 102(1998) : 205-212.

12. กิติศักดิ์ พลอยพาณิชเจริญ. หลักการควบคุมคุณภาพ. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.
13. ดร.อัศม์เดช วานิชชินชัย. รหัสลับ พาเรโต้. Process Management, 2553 : 81-86.
14. ศุภชัย นาทะพันธ์. การควบคุมคุณภาพ. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2551.
15. Rastogi, N.K., Cassano, A. and Basile, A. Advances in Membrane Technologies for Water Treatment. Water treatment by reverse and forward osmosis 2015 : 130-153.
16. Hoornaert, P. Introduction Reverse osmosis. England : Pergamon Press Ltd., 1984.
17. Singh, R.P. Introduction to Food Engineering. ed. 4. Lincoln : University of Nebraska, 2009.
18. Jacobs, I.C. Microencapsulation in the Food Industry. Missouri : Jacobs Controlled Release Consulting, 2014.
19. Masters, K. Spray Drying in Practice. New York : Longman Scientific, 2002.
20. S Surbkar, R., Wongsiriamnuay, T., and Surbkar, S. Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles. Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering. 2012 18(1) : 24-33.
21. Nataraj, S.K., Hosamani, K.M., and Aminabhavi, T.M. Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis processes. Water Research. 2006 40 : 2349-2356.
22. ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2543.
23. Shang, S.M., Process control in printing of textiles in A volume in Woodhead Publishing Series in Textiles. Witney : Woodhead Publishing Limited, 2013.
24. Odegaard, H. and Koottatep, S. Removal of Humic Substances from Natural Water by Reverse Osmosis. Water Research. 1982 16(5) : 613-620.
25. Porter, J.J., and Goodman, G.A. Recovery of Hot Water, Dyes and Auxiliary Chemicals from Textile Wastestreams. Desalination. 1984 49 : p. 185-192.
26. Cai, Y.Z. and Corke, H. Production and Properties of Spray-dried Amaranthus Betacyanin Pigments. Journal of food science. 2000 65 : 1248-1252.

27. León-Martínez, F.M., Méndez-Lagunas, L.L, and Rodríguez-Ramírez, J. Spray drying of nopal mucilage (Opuntia ficus-indica): Effects on powder properties and characterization. Carbohydrate Polymers. 2010 81 : 864-870.

28. Laokuldilok, T., and Kanha, N. Effects of processing conditions on powder properties of black glutinous rice *(Oryza sativa L.)* bran anthocyanins produced by spray drying and freeze drying. LWT - Food Science and Technology. 2015 64 : 405-411.

29. Daza, L.D., et al. Effect of spray drying conditions on the physicalproperties of Cagaita (Eugenia dysenterica DC.) fruitextracts. Food and Bioproducts Processing, 2016 97 : 20-29.

30. F Fu, W.-Y. and Etzel, M.R. Spray Drying of Lactococcus lactis ssp. lactis C2 and Cellular Injury. Journal of Food Science. 1995 60(1) : 195-200.

31. Maury, M., et al. Effects of process variables on the powder yield of spray-dried trehalose on a laboratory spray-dryer. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. 2005 59 : 565-573.

32. Jamaleddine, T.J., et al. Effect of interaction between spray and attrition jets in a high temperature fluidized bed. Powder Technology. 2015 278 : 57-64.

33. Chawla, A., et al. Production of spray dried salbutamol sulphate for use in dry powder aerosol formulation. International Journal of Pharmaceutics 1994 108 : 233-240.

34. Jinapong, N., Suphantharika, M., and Jamnong, P. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. Journal of Food Engineering. 2008 84 : 194-205.

35. Adler, M., and Lee, G. Stability and Surface Activity of Lactate Dehydrogenase in Spray-Dried Trehalose. Journal of Pharmaceutical Sciences, 1999 88(2) : 199-208.

36. Fuchs, M., et al. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration. Journal of Food Engineering. 2006 75 : 27-35.

37. Link, K.C., and Schlu¨nder, E.-U. Fluidized bed spray granulation Investigation of the coating process on a single sphere. Chemical Engineering and Processing. 1997 36 : 443-457.

Chulalongkorn University

38. Lee, K., and Wei, C. Reducing Mold Changing Time by Implementing Lean Six Sigma. Quality and Reliability Engineering International. 2009 26 : 387-395..

39. Garland, R. Six Sigma Project to Improve a Management of Change Process. Process Safety Progress. 2010 30(1) : 18-23.

40. ยุทธ ไกยวรรณ์. การวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรสำหรับงานวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอาภาพร จันทะมาศ เกิดวันที่ 21 เมษายน พ.ศ.2535 จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปี พ.ศ.2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม จากนั้นในปี พ.ศ.2557 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับชั้นปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University