

การลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ใน
อุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมผ้าฝ้าย

นางสาวอริยา สุวรรณนิกรกุล

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

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reduction of Cycle Time of Sulfolane Recovery Process in Cyanuric Fluoride
Manufacturing in Textile Dye Industry

Miss Areeya Suwannikornkul



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

การลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน
ในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรมการผลิตสี
ย้อมผ้าฝ้าย

โดย

นางสาวอริยา สุวรรณนิกรกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โอสสถิลป์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ทิไชย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โอสสถิลป์)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

5770358221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: SIX SIGMA / OPTIMAL SOLUTION / RESPONSE SURFACE METHOD /
REDUCTION OF CYCLE TIME / BOX-BEHNKEN DESIGN

AREEYA SUWANNIKORNKUL: Reduction of Cycle Time of Sulfolane Recovery
Process in Cyanuric Fluoride Manufacturing in Textile Dye Industry. ADVISOR:
ASST. PROF. NAPASSAVONG OSOTHSILP, Ph.D., 116 pp.

This research aims to reduce the cycle time in the cyanuric fluoride manufacturing process by reducing cycle time of the bottle neck steps, which are sedimentation step and distillation step. In addition, it was required to control the salt content and the sulfolane content to be within the specification limits. The research applied Six Sigma Methodology.

The causes of long cycle time were determined and selected by applying criteria of Failure Mode and Effects Analysis. The Response Surface Methodology with Box-Behnken design was employed to evaluate the effects of six factors on the responses, and to find out the optimal settings. The optimal condition of sedimentation step is flow rate of 1,115 kilograms/hour, speed agitator of sedimentation tank of 0.5 rounds/minute and period time of sedimentation of 0 hour and the optimal condition of distillation step is pressure of 30 mbar, temperature of 180 °C and speed agitator of vertical dryer of 20 rounds/minute. After that, confirmation test was operated to ensure that the new setting of machines could reduce cycle time, salt content and sulfolane content. In Control phase, control plan was set up to control process factors and responses.

After improvement, the cycle time of sedimentation step was reduced from 12.29 hours/batch to 9.2 hours/batch. The cycle time of distillation step was reduced from 12.23 hours/batch to 9.64 hours/batch. Moreover, the salt content was reduced from 0.94% to 0.72% and the sulfolane content was reduced from 2.55% to 1.17%, which correspond to the factory specification.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้ทำงานวิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้อดทนเหน็ดเหนื่อย ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆเรื่อง ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น ในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์มิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้เกียรติ มาทำหน้าที่ พร้อมให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้อง และสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัท ฮันท์สแมน (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการสนับสนุนและอนุเคราะห์ในการศึกษาวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณนพดนัย ขจรไพศาลและหน่วยงานการผลิต ที่เสียสละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาอุตสาหกรรมทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมถึงพนักงานและเจ้าหน้าที่ ภาควิชาทุกท่าน

สุดท้ายขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับครอบครัว ที่เป็นผู้ให้กำลังใจในการเรียนและสนับสนุนทุนทรัพย์สำหรับการศึกษาของผู้วิจัยมาตลอด และอีกหลายคนที่ไม่ได้กล่าวนามที่มีส่วนช่วยทำให้วิทยานิพนธ์ครั้งนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	7
1.4 ผลที่ได้รับ.....	7
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma)	10
2.1.1 ประวัติและความเป็นมา	10
2.1.2 ความหมายของซิกซ์ ซิกมา	10
2.1.3 ขั้นตอนและการประยุกต์ใช้	11
2.2 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methods).....	13
2.2.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design).....	14
2.3 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis) ..	15
2.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ	15

2.3.2	ประเภทของการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ	16
2.3.3	ขั้นตอนการจัดทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิต.....	16
2.4	วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือ และความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน	23
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน... ..	24
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไฮยานูริกฟลูออไรด์.....	26
บทที่ 3	การศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา	28
3.1	การจัดตั้งทีมงาน	28
3.2	กระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน (Sulfolane Recovery Process).....	29
3.2.1	ขั้นตอนที่ 1: ขั้นตอนการตกตะกอน.....	30
3.2.2	ขั้นตอนการตรวจสอบความเข้มข้นของสาร.....	31
3.2.3	ขั้นตอนที่ 2: ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง	32
3.2.4	ขั้นตอนที่ 3: ขั้นตอนการกลั่นแห้ง	32
3.2.5	ขั้นตอนการตรวจสอบปริมาณน้ำในสารซัลโฟลัน (Water Content: W/C).....	33
3.3	สภาพปัญหาปัจจุบัน	33
3.4	สรุปการศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา	34
บทที่ 4	การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา.....	37
4.1	แนวทางการลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน	37
4.2	การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลา	39
4.3	สรุปการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา.....	58
บทที่ 5	การวิเคราะห์สาเหตุและการกำหนดแนวทางในการปรับปรุง	59
5.1	การกำหนดตัวแปรตอบสนอง.....	59
5.2	การกำหนดแบบการทดลอง	59
5.3	การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย	61

5.3.1 ปัจจัย	61
5.3.2 ระดับของปัจจัย	62
5.4 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง	63
5.5 ผลการทดลอง	64
5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	66
5.6.1 การตรวจสอบสมมติฐาน	66
5.6.2 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์	69
5.6.2.1 ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1	71
5.6.2.2 ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือ	74
5.6.2.3 ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3	77
5.6.2.4 ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลัน ...	80
5.7 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plots)	82
5.7.1 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของรอบเวลาและปัจจัย ในขั้นตอนที่ 1	82
5.7.2 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของ เกลือและปัจจัยในขั้นตอนที่ 1	83
5.7.3 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของรอบเวลาและปัจจัย ในขั้นตอนที่ 3	83
5.7.4 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของ สารซัลโฟลันและปัจจัยในขั้นตอนที่ 3	84
5.8 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุและการกำหนดแนวทางในการปรับปรุง	85
บทที่ 6 การปรับปรุงกระบวนการ	87
6.1 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม	87
6.1.1 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 1	88

6.1.2 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 3	91
6.2 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ.....	94
บทที่ 7 การยืนยันผลและการควบคุมกระบวนการ.....	95
7.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลสมการความสัมพันธ์.....	95
7.2 การออกแบบการควบคุมกระบวนการ.....	96
7.2.1 การกำหนดวิธีการปฏิบัติงานใหม่ (Work Instruction)	96
7.2.2 การสร้างแผนควบคุม (Control Plan)	100
7.3 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง.....	105
7.4 สรุปผลการควบคุมกระบวนการ.....	107
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	109
8.1 การศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา.....	109
8.3 การวิเคราะห์สาเหตุและการกำหนดแนวทางในการปรับปรุง.....	110
8.4 การปรับปรุงกระบวนการ.....	110
8.5 การยืนยันผลและการควบคุมกระบวนการ.....	111
8.6 ข้อจำกัด.....	111
8.7 ข้อเสนอแนะ.....	112
รายการอ้างอิง.....	113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	116

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของข้อบกพร่อง (AIAG)	18
ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การประเมินผลโอกาสการเกิดขึ้นของข้อบกพร่อง (AIAG).....	20
ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การประเมินผลการตรวจจับของระบบควบคุม (AIAG).....	20
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของข้อบกพร่อง	44
ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การประเมินผลโอกาสการเกิดขึ้นของข้อบกพร่อง.....	45
ตารางที่ 4.3 เกณฑ์การประเมินผลการตรวจจับของระบบควบคุม.....	46
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนที่ 1	48
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนที่ 3	49
ตารางที่ 5.1 ระดับของปัจจัยในสภาวะปัจจุบันและระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนที่ 1	62
ตารางที่ 5.2 ระดับของปัจจัยในสภาวะปัจจุบันและระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนที่ 3	62
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 1.....	64
ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 3.....	65
ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ของขั้นตอนที่ 1	96
ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ของขั้นตอนที่ 3	96
ตารางที่ 7.3 วิธีการปฏิบัติงานของขั้นตอนที่ 1.....	98
ตารางที่ 7.4 วิธีการปฏิบัติงานของขั้นตอนที่ 3.....	99
ตารางที่ 7.5 แผนควบคุมปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ของกระบวนการนำสารซิลโฟลานกลับคืน	102
ตารางที่ 7.6 แบบฟอร์มการตรวจสอบ (Check Sheet).....	102
ตารางที่ 7.7 เปรียบเทียบผลตอบสนองก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง.....	106

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 วิธีการสังเคราะห์ไซยานูริกฟลูออไรด์.....	1
รูปที่ 1.2 กระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน (Sulfolane Recovery Process)	3
รูปที่ 2.1 กระบวนการในการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง DMAIC	12
รูปที่ 2.2 สถานะการทดลอง (Treatments) ของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ตัวแปร.....	14
รูปที่ 2.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย.....	14
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาระหว่างไซยานูริกคลอไรด์และไซเตียมฟลูออไรด์	27
รูปที่ 3. 1 กระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน (Sulfolane Recovery Process).....	30
รูปที่ 3.2 ถังตกตะกอน.....	31
รูปที่ 3.3 ถังเก็บน้ำล้าง.....	32
รูปที่ 3.4 เครื่องกลั่นระเหยแห้ง.....	32
รูปที่ 3.5 เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง.....	33
รูปที่ 3.6 ถังรับ.....	33
รูปที่ 4.1 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอน.....	40
รูปที่ 4.2 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนการกลั่นแห้ง	41
รูปที่ 4.3 แผนภูมิพาเรโต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า RPN กับ ปัจจัยสาเหตุที่มีผลต่อรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1.....	57
รูปที่ 4.4 แผนภูมิพาเรโต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า RPN กับ ปัจจัยสาเหตุที่มีผลต่อรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3.....	57
รูปที่ 5.1 จำนวนครั้งการทดลองโดยโปรแกรม MINITAB	60
รูปที่ 5.2 รายละเอียดการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม MINITAB.....	60
รูปที่ 5.3 เมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ของแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	61
รูปที่ 5.4 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของรอบเวลาขั้นตอนที่ 1.....	66

รูปที่ 5.5 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของค่าความเข้มข้นเกลือในชั้นตอนที่ 1.....	66
รูปที่ 5.6 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของรอบเวลาชั้นตอนที่ 3.....	67
รูปที่ 5.7 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในชั้นตอนที่ 3.....	67
รูปที่ 5.8 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูลของรอบเวลาชั้นตอนที่ 1.....	67
รูปที่ 5.9 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูลของค่าความเข้มข้นเกลือในชั้นตอนที่ 1.....	67
รูปที่ 5.10 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูลของรอบเวลาชั้นตอนที่ 3.....	68
รูปที่ 5.11 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูลของค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในชั้นตอนที่ 3.....	68
รูปที่ 5.12 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณข้อมูลของรอบเวลาชั้นตอนที่ 1.....	68
รูปที่ 5.13 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณข้อมูลของค่าความเข้มข้นเกลือในชั้นตอนที่ 1.....	68
รูปที่ 5.14 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณข้อมูลของรอบเวลาชั้นตอนที่ 3.....	69
รูปที่ 5.15 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณข้อมูลของค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในชั้นตอนที่ 3... ..	69
รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในชั้นตอนที่ 1.....	71
รูปที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในชั้นตอนที่ 1 โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ.....	72
รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือในชั้นตอนที่ 1.....	74
รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือในชั้นตอนที่ 1 โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ.....	75
รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในชั้นตอนที่ 3.....	77
รูปที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในชั้นตอนที่ 3 โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ.....	78
รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในชั้นตอนที่ 3.....	80
รูปที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในชั้นตอนที่ 3 โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ.....	81

รูปที่ 5.24 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้และช่วงเวลารอกการ ตกตะกอนต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1	82
รูปที่ 5.25 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้และความเร็วใบพัด ของถังตกตะกอนต่อค่าความเข้มข้นของเกลือ	83
รูปที่ 5.26 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิต่อรอบเวลา ของขั้นตอนที่ 3	84
รูปที่ 5.27 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วใบพัดของ เครื่องกลั่นแห้งต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3	84
รูปที่ 5.28 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเร็วใบพัดของ เครื่องกลั่นแห้งต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3	84
รูปที่ 5.29 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิต่อค่าความ เข้มข้นของสารซัลโฟลาน.....	85
รูปที่ 6.1 รูปแสดงสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 1.....	89
รูปที่ 6.2 ผลกระทบหลักของความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนที่มีผลต่อรอบเวลาขั้นตอนที่ 1.....	90
รูปที่ 6.3 ผลกระทบหลักของช่วงเวลารอกการตกตะกอนที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของเกลือ	91
รูปที่ 6.4 รูปแสดงสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 3.....	93
รูปที่ 6.5 ผลกระทบหลักของความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งที่มีผลต่อค่าความเข้มข้น ของสารซัลโฟลาน	93
รูปที่ 7.1 แผนภูมิการควบคุม I-MR ของตัวแปรตอบสนอง.....	104
รูปที่ 7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง	105

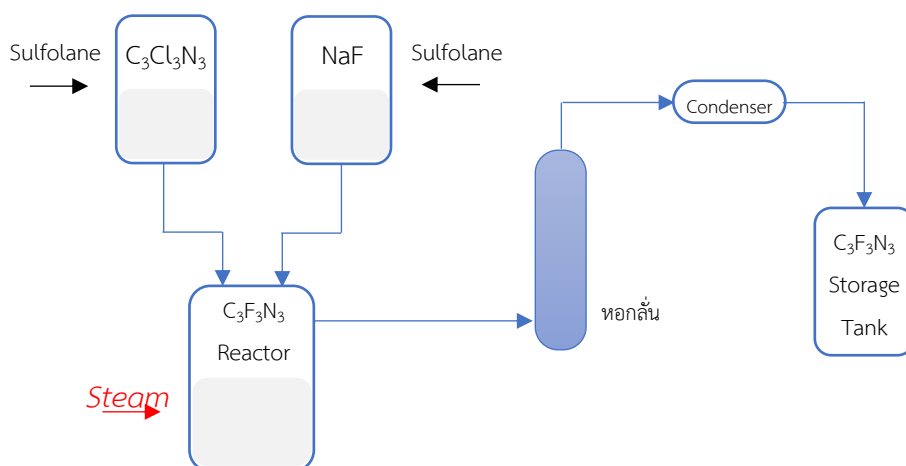
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานที่ทำการศึกษาคือโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีย้อมผ้า มีผลิตภัณฑ์หลักอยู่ 2 กลุ่ม คือ สีย้อมผ้าฝ้าย และสีย้อมผ้าขนสัตว์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลิตภัณฑ์สีย้อมผ้าฝ้าย ซึ่งกระบวนการผลิตสีย้อมผ้าฝ้ายประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ โดยจะแบ่งเป็น 3 โรงงานย่อยตามแต่ละขั้นตอนหลัก ได้แก่ โรงงานสังเคราะห์พิเศษหรือเอสเอสยู (Specialty Synthesis Unit: SSU Plant) โรงงานสังเคราะห์สี (Synthesis Plant) และโรงงานสำเร็จรูป (Finishing Plant) ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะภายในโรงงานสังเคราะห์พิเศษ ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่ในการสังเคราะห์ไซยานูริกฟลูออไรด์ (Cyanuric Fluoride: $C_3F_3N_3$) ซึ่งเป็นสารเคมีที่นำมาใช้เป็นหมู่เกาะผ้า วิธีการสังเคราะห์ไซยานูริกฟลูออไรด์นั้นจะใช้ไซยานูริกคลอไรด์ (Cyanuric Chloride: $C_3Cl_3N_3$) ทำปฏิกิริยากับโซเดียมฟลูออไรด์ (Sodium Fluoride: NaF) โดยผสมสารเคมีทั้งสองตัวในตัวทำละลายซัลโฟลัน (Sulfolane) จากนั้นส่งสารทั้ง 2 ชนิดในรูปของเหลวมาควมผสมให้เข้ากันในถังปฏิกิริยาและให้ความร้อน ต่อจากนั้นทำการแยกไซยานูริกฟลูออไรด์ ในถังปฏิกิริยาออกจากสารเคมีตัวอื่นที่ไม่ต้องการโดยใช้กระบวนการกลั่น สารที่มีจุดเดือดต่ำ (Boiling Point) ที่สุดจะถูกกลั่นแยกออกมาก่อนโดยการควบแน่น ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 วิธีการสังเคราะห์ไซยานูริกฟลูออไรด์

สารที่คงเหลือจากการกลั่นโซเดียมคลอไรด์ คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) และตัวทำละลายซัลโฟลัน จะถูกส่งเข้าสู่ถังพัก (Buffer Tank) ซึ่งจะช่วยปรับสภาพความเป็นกรดและเบสของสารละลายก่อนที่จะส่งเข้าสู่กระบวนการของการนำสารเคมีกลับคืน (Recovery Process)

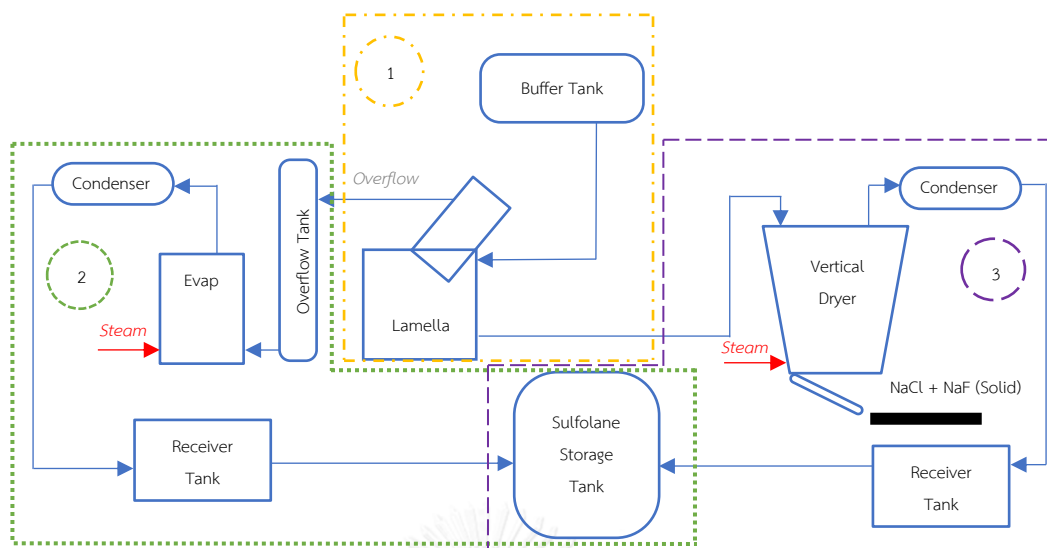
ปัจจุบันรอบเวลาที่ใช้ในการผลิตโซเดียมคลอไรด์ทั้งกระบวนการ (Cycle Time) เฉลี่ย 12 ชั่วโมง/รอบการผลิต ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาแยกการผลิตโซเดียมคลอไรด์ออกเป็น 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการผลิตโซเดียมคลอไรด์และกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน สำหรับกระบวนการผลิตโซเดียมคลอไรด์นั้นใช้รอบเวลาในการผลิตเฉลี่ย 8 ชั่วโมง แต่กระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนใช้รอบเวลาเฉลี่ย 12 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า กระบวนการผลิตโซเดียมคลอไรด์นั้นใช้เวลาน้อยกว่า จึงทำให้กระบวนการนี้ต้องรอกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนเฉลี่ย 4 ชั่วโมง/รอบการผลิต จึงจะสามารถเริ่มทำการผลิตโซเดียมคลอไรด์รอบต่อไปได้ ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน

ผู้วิจัยจึงทำการศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน ดังรูปที่ 1.2 โดยแบ่งกระบวนการดังกล่าวออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ ขั้นตอนการตกตะกอน เริ่มตั้งแต่รับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในตัวทำละลายซัลโฟลัน (NaCl-Sul) จากถังพักมายังถังตกตะกอน (Lamella) จนกระทั่งสารล้นออกไป รวมถึงป้อนเกลือไปยังเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (Vertical Dryer)

ขั้นตอนที่ 2 คือ ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง จะเริ่มตั้งแต่การรับสารที่ล้นมาเก็บที่ถังเก็บน้ำล้น (Overflow Tank) แล้วส่งไปกลั่นที่เครื่องกลั่นระเหยแห้ง (Evaporator) แล้วจึงส่งไปเก็บที่ถังเก็บสารซัลโฟลัน (Sulfolane Storage Tank)

ขั้นตอนที่ 3 คือ ขั้นตอนการกลั่นแห้ง จะทำการกลั่นที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง จนกระทั่งส่งไปเก็บที่ถังเก็บสารซัลโฟลัน



รูปที่ 1.2 กระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน (Sulfolane Recovery Process)

รอบเวลาของแต่ละขั้นตอนแตกต่างกันออกไปดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 3 นั้นใช้รอบเวลาเฉลี่ย 12 ชั่วโมงเท่าๆกัน ส่วนขั้นตอนที่ 2 รอบเวลาเฉลี่ย 8 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า ขั้นตอนที่ทำให้รอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนนาน คือ ขั้นตอนที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 3 ซึ่งมีผลทำให้รอบเวลาที่ใช้ในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ยาวนานถึง 12 ชั่วโมง/รอบการผลิต ดังนั้นเพื่อจะทำให้รอบเวลาที่ใช้ในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ลดลง จึงต้องทำการศึกษาวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 3 เพื่อลดรอบเวลาใช้ในขั้นตอนดังกล่าวลง โดยมีเป้าหมายว่ารอบเวลาของขั้นตอนทั้งสองจะต้องลดลงเหลือ 8 ชั่วโมง ซึ่งจะเท่ากับรอบเวลาของกระบวนการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์

ขั้นตอนที่ 1 ของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน เริ่มจากการนำสาร NaCl –Sul จากถังพักส่งไปยังถังตกตะกอน โดยแบ่งการรับสารเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกจะรับมาด้วยอัตราการไหลที่เร็ว (1,000 – 1,200 กิโลกรัม/ชั่วโมง) เพื่อให้สาร NaCl–Sul เต็มถังตกตะกอนอย่างรวดเร็ว จากเดิมที่มีปริมาณซัลโฟลานประมาณ 4,000 กิโลกรัมค้างจากรอบการผลิตที่แล้ว รับเพิ่มมาอีกประมาณ 3,000 กิโลกรัมในรอบการผลิตนี้ จะทำให้เต็มความจุถังตกตะกอน (7,000 กิโลกรัม) พอติ จากนั้นจึงรอให้เกิดการตกตะกอนประมาณ 1 ชั่วโมง ระหว่างนี้จะต้องควบคุมให้อุณหภูมิ (Temperature) อยู่ที่ 145 – 155 °C และความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (Speed of Agitator) เท่ากับ 0.5 รอบ/นาที ในการคนสารไปพร้อมๆกัน ซึ่งการตกตะกอน (Sedimentation) จะทำให้เกิดการแยกของแข็ง (Solid) ที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว (Liquid) ของแข็งซึ่งก็คือเกลือโซเดียมคลอไรด์และเกลือโซเดียมฟลูออไรด์ จะตกตะกอนจะอยู่บริเวณก้นถังตกตะกอน ส่วนของเหลวคือ สารซัลโฟลานที่มีความเข้มข้นของเกลือ

(Salt Content) น้อย หลังจากครบ 1 ชั่วโมงจึงจะเริ่มทำการรับสารครั้งที่สอง นั่นก็คือ การรับสาร NaCl-Sul ที่เหลือเข้ามาด้วยอัตราการไหลที่ช้าจนหมดถังพัก ซึ่งระหว่างการปล่อยสารส่วนนี้จะทำให้สารนั้นค่อยๆ ล้นออกมาจากถังตกตะกอน จากนั้นจึงปั๊มเกลือโซเดียมคลอไรด์และเกลือโซเดียมฟลูออไรด์ออกจากบริเวณก้นถังตกตะกอนให้ได้มากที่สุดแล้วส่งไปยังเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง เป็นอันสิ้นสุดขั้นตอนที่ 1 ต่อจากขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนของการกลั่นสาร โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 2 กลั่นสารที่เครื่องกลั่นระเหยแห้ง และขั้นตอนที่ 3 กลั่นสารที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง

ขั้นตอนที่ 2 การกลั่นสารที่เครื่องกลั่นระเหยแห้ง สารที่ทำการกลั่นในขั้นตอนนี้คือ สาร NaCl-Sul ที่ล้นออกมาจากถังตกตะกอน ภายหลังจากที่สารล้นออกมา สารจะเข้าสู่ถังเก็บน้ำล้น (ความจุ 1,000 ลิตร) โดยถังนี้จะทำหน้าที่ในเก็บสารและนำไปตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือว่าน้อยกว่า 1% หรือไม่ เพราะต้องการให้สารที่ล้นออกมามีเกลือเจือปนอยู่น้อยที่สุด ถ้าความเข้มข้นของเกลือน้อยกว่า 1% จะส่งสารเข้าสู่กระบวนการกลั่น กระบวนการกลั่นสารที่เครื่องกลั่นระเหยแห้งนี้จะทำหน้าที่ในการแยกเกลือและสารซัลโฟลันออกจากกัน โดยใช้สมบัติของสารที่มีจุดเดือดแตกต่างกัน เริ่มต้นการกลั่นด้วยการลดความดันอากาศ (Pressure) ของเครื่อง จากปกติ 1,000 mbar ให้เหลือประมาณ 40 – 60 mbar เพื่อให้จุดเดือดของสารซัลโฟลัน ซึ่งปกติเท่ากับ 286 °C ลดลงเหลือประมาณ 160 – 200 °C ก่อนที่จะให้ความร้อนใกล้เคียงกับจุดเดือดของสาร เพื่อให้สารซัลโฟลันระเหยเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส (Gas) ซึ่งแก๊สนี้จะส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อเปลี่ยนสถานะจากแก๊สกลับเป็นของเหลว จากนั้นจะส่งไปยังถังรับ (Receiver Tank) ซึ่งถังนี้จะทำหน้าที่ในการรับสารและนำไปตรวจสอบปริมาณน้ำในสารซัลโฟลันที่กลั่นเสร็จ (Water Content) จาก ว่าน้อยกว่า 0.1% หรือไม่ เนื่องมาจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีน้ำเจือปนเข้ามาภายในระบบ ถ้าน้อยกว่า 0.1% จะส่งไปเก็บที่ถังเก็บสารซัลโฟลัน

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 1 จะเริ่มขั้นตอนที่ 3 คือ การกลั่นที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง กระบวนการทำงานของเครื่องนี้คล้ายกันกับเครื่องกลั่นระเหยแห้ง คือจะลดความดันอากาศ เพื่อให้จุดเดือดของสารลดลง ก่อนที่จะให้ความร้อนกับเครื่องกลั่นมากกว่าหรือเท่ากับจุดเดือดของสาร เพื่อให้สารระเหยเป็นแก๊ส แล้วจึงส่งเข้าเครื่องควบแน่นเพื่อทำให้เปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของเหลวเช่นเดิม แต่ความแตกต่างของเครื่องกลั่นทั้งสอง คือ เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งจะมีใบพัดไว้สำหรับคนสารให้เข้ากันด้วย โดยความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งที่ใช้อยู่เท่ากับ 20 รอบ/นาที ภายหลังจากการกลั่นจะได้เกลือโซเดียมคลอไรด์ เกลือโซเดียมฟลูออไรด์และสารซัลโฟลัน เกลือทั้งสองจะถูกส่งไปกำจัดทิ้งโดยที่จะนำเกลือมาส่วนหนึ่งเพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน (Sulfolane Content) ว่าน้อยกว่า 3% หรือไม่ เนื่องจากต้องการให้สารซัลโฟลันในเกลือที่กลั่นออกมาระเหยออกไปมากที่สุด ส่วนสารซัลโฟลันที่กลั่นมาได้จะถูกส่งไปเก็บที่ถังรับแล้วนำไปตรวจสอบปริมาณน้ำ

ในสารซัลโฟลาน ว่าน้อยกว่า 0.1% หรือไม่ ก่อนนำไปรวมกันกับสารที่กลั่นเสร็จแล้วในขั้นตอนที่ 2 ที่ถึงเก็บสารซัลโฟลาน เพื่อนำไปใช้ต่อในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ต่อไป

สารซัลโฟลานเป็นสารที่ใช้เป็นตัวทำละลายสารไซยานูริกคลอไรด์และสารโซเดียมฟลูออไรด์ในการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ทุกกระบวนการผลิต สาเหตุที่เลือกใช้สารซัลโฟลาน เพราะมีจุดเดือดสูง เสถียรภาพดี ไม่สลายตัวง่าย แต่พบว่าการเลือกใช้สารนี้มีข้อเสีย คือ มีราคาค่อนข้างสูง (118.7 บาท/กิโลกรัม) ซึ่งโดยปกติแล้วปริมาณซัลโฟลานที่ใช้อยู่ที่ประมาณ 3,700 กิโลกรัม/รอบการผลิต เมื่อคำนวณ “ต้นทุนของสารซัลโฟลาน” ที่ต้องใช้ในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์นั้นเท่ากับ 439,190 บาท/รอบการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับ “ต้นทุนในการผลิต” ต้นทุนของสารซัลโฟลานมีค่าสูงกว่ามาก ต้นทุนในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า ในปัจจุบันมีค่าประมาณ 5,040 บาท/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 60,480 บาท/รอบการผลิต จะเห็นได้ว่าสมควรที่จะจัดทำกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน แทนที่จะทำการจัดซื้อสารซัลโฟลานใหม่ในทุกๆ รอบการผลิต

ถ้าหากสามารถลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนมาได้ ยังสามารถทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงด้วย ในกรณีที่สามารถลดรอบเวลาของกระบวนการได้ตามเป้าหมายกล่าวคือ จาก 12 ชั่วโมง เหลือ 8 ชั่วโมง จะทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิตได้เท่ากับ 20,160 บาท/รอบการผลิต (ลดลง 4 ชั่วโมง/รอบการผลิต = $5,040 \times 4 = 20,160$ บาท/รอบการผลิต) ซึ่งปกติภายในเวลา 1 ปี จะทำการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ประมาณ 325 รอบการผลิต (จำนวนรอบการผลิตในปีพ.ศ. 2555 – ปีพ.ศ. 2557 มาเฉลี่ยกันจำนวน 3 ปี) เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า เมื่อคำนวณต้นทุนในการผลิตเป็นรายปี จะทำให้ประหยัดไปได้ 6,552,000 บาท/ปี (325 รอบการผลิต/ปี \times $20,160$ บาท/รอบการผลิต = $6,552,000$ บาท/ปี) การประหยัดต้นทุนในการผลิตลงได้นั้นเป็นผลมาจากการที่สามารถลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนมาได้ นอกจากนี้ก็จะสามารถทำให้ผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ได้ปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถผลิตสีย้อมผ้าได้เพิ่มขึ้น เพื่อรองรับกับความต้องการของลูกค้าที่มีแนวโน้มมากขึ้น

หลังจากผู้วิจัยได้ทำการศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน จึงทราบว่า ค่าที่ตั้งไว้ของแต่ละปัจจัยได้มาจากประสบการณ์การทำงานและความรู้ทางด้านเคมีเบื้องต้นของผู้ปฏิบัติงานเท่านั้น เมื่อนำไปใช้แล้วยังเกิดรอบเวลายาวนาน ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมุ่งพิจารณาผลกระทบในเรื่องของรอบเวลาเพียงอย่างเดียว แต่ยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบเรื่องของคุณภาพของสารซัลโฟลานที่ได้ซึ่งไม่สามารถคำนวณได้ ก่อนที่จะทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จะต้องทำการพิสูจน์ว่าแต่ละปัจจัยมีนัยสำคัญทางสถิติต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจหรือไม่ ซึ่งการดำเนินงานในลักษณะดังกล่าวมีความสอดคล้องกับกระบวนการดำเนินงานของซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ที่ตัดสินใจหรือ

กำหนดวิธีการปรับปรุงโดยอาศัยข้อมูลและการวิเคราะห์ทางสถิติ ผู้วิจัยจึงเลือกกระบวนการซิกซ์ ซิกมา มาใช้ในงานวิจัยนี้ [1]

การแข่งขันทางด้านธุรกิจในปัจจุบันนี้ ทุกธุรกิจจำเป็นต้องมีการปรับปรุงที่สามารถเพิ่มรูปแบบของผลิตภัณฑ์และการบริการที่ดีกว่าอยู่เสมอ การลดข้อบกพร่องของการผลิตและความผิดพลาดของการบริการเป็นการปรับปรุงให้กระบวนการดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลตอบสนองจากลูกค้าเร็วขึ้น และทักษะการทำงานของลูกจ้างที่ดีขึ้น กระบวนการดำเนินงานซิกซ์ ซิกมา เป็นกระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนไม่สามารถหาคำตอบได้ในทันที จึงต้องทำการทดลองและเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ลดความแปรผันที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์และกระบวนการโดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งสามารถค้นหาและกำจัดสาเหตุของข้อบกพร่องและความผิดพลาด ลดรอบเวลา ลดค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน ปรับปรุงผลิตภาพ เพิ่มผลผลิต และเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า [2] โดยกระบวนการดังกล่าวจะมุ่งเน้นแก้ไขปรับปรุงกระบวนการอย่างเป็นขั้นตอนและต่อเนื่อง ตั้งแต่ขั้นตอนของการนิยามปัญหา (Define Phase) จะทำการเลือกปัญหาที่เป็นเรื่องสำคัญจริงๆ มาศึกษา ขั้นตอนการวัด (Measure Phase) เพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา (Analyze Phase) เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลค้นหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อปัญหา ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve Phase) ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย เพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด และสุดท้ายขั้นตอนการควบคุม (Control Phase) จะดำเนินการจัดทำวิธีการควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อให้กระบวนการต่างๆ อยู่ภายใต้การควบคุมและอยู่ยั่งยืนต่อไป

มีงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับการลดรอบเวลาในการผลิต ซึ่งเริ่มการดำเนินงานวิจัยด้วยการวิเคราะห์หาสาเหตุและผลกระทบ จากนั้นจึงใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง ประเภทการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เพื่อหาค่าปรับตั้งเครื่องจักรที่ดีที่สุดเพื่อให้รอบเวลาในการผลิตต่ำที่สุด ในขณะที่ต้องสามารถควบคุมไม่ให้ตัวแปรตอบสนองอื่นเกินกว่าค่าที่กำหนด สุดท้ายจึงทำการทดลองเพื่อยืนยันว่าการตั้งค่าเครื่องจักรใหม่สามารถลดรอบเวลาและสามารถควบคุมตัวแปรตอบสนองอื่นได้จริง ในงานวิจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์และขั้นตอนการดำเนินงานใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เพียงแต่เป็นอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน จึงต้องปรับขั้นตอนการดำเนินงานและเลือกแบบการทดลองให้มีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานที่สามารถลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนได้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ศึกษาในโรงงานผลิตสีย้อมผ้าฝ้าย ภายในโรงงานสังเคราะห์พิเศษ
2. ศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน ในขั้นตอนดังต่อไปนี้
 ขั้นตอนที่ 1 คือ ขั้นตอนการตกตะกอน
 ขั้นตอนที่ 3 คือ ขั้นตอนการกลั่นแห้ง
3. ตัวแปรตอบสนองที่สนใจคือ รอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลัน ความเข้มข้นของเกลือในสารซัลโฟลัน และความเข้มข้นของสารซัลโฟลันในเกลือ

1.4 ผลที่ได้รับ

วิธีการปฏิบัติงานที่เหมาะสมและสามารถลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถนำสารซัลโฟลันกลับมาใช้ได้ใหม่ในเวลาเร็วขึ้น และทำให้ลดต้นทุนในการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การศึกษาข้อมูล
 ศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนตามขั้นตอนของซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับรอบเวลาของกระบวนการดังกล่าวที่ละขั้นตอน พร้อมทั้งพิจารณาผลกระทบที่จะทำให้สารซัลโฟลันไม่บริสุทธิ์
2. ระยะนิยามปัญหา (Define Phase)
 - ก. ศึกษาจากงานวิจัยที่มีรายงานไว้ และศึกษาจากวิธีการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ในโรงงานที่ศึกษา เพื่อรวบรวมข้อมูลในการอธิบายสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น
 - ข. กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และเป้าหมาย
 - ค. สรุปลผลและวางแผนกำหนดแนวทางการดำเนินงานขั้นตอนต่อไป
3. ระยะเวลาการวัดเพื่อเก็บข้อมูลเกี่ยวกับปัญหา (Measure Phase)

- ก. เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ความสามารถในปัจจุบันของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน โดยใช้รอบเวลาของกระบวนการเป็นปัจจัยสำคัญ แล้วนำข้อมูลที่รวบรวมและวิเคราะห์มาเป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา
 - ข. ระดมสมองเพื่อหาปัจจัยสาเหตุของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำการศึกษา จากนั้นจะลำดับความสำคัญของสาเหตุนั้น โดยใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Criteria of Failure Mode and Effects Analysis) ประเภท Process FMEA)
 - ค. ทำการเลือกปัจจัยสาเหตุของปัญหาที่จะนำไปศึกษาต่อโดยแบ่งเป็น ปัจจัยที่สามารถนำไปทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม และปัจจัยที่สามารถดำเนินการปรับปรุงได้เลย
4. ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)
- ก. สำหรับปัจจัยที่ต้องทำการทดลองจะออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อพิสูจน์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยเหล่านั้น
 - ข. ปรับปรุงปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองก่อนทำการทดลอง
 - ค. ทำการทดลองในกระบวนการผลิตจริง โดยใช้แบบการทดลองที่กำหนดไว้ และเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองที่กำหนดไว้ทุกสภาวะการทดลอง
 - ง. วิเคราะห์ผลการทดลอง หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่มีนัยสำคัญและตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์
 - จ. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆและตัวแปรตอบสนอง โดยใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plots)
5. ระยะการปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase)
- ก. วิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย และนำไปปรับปรุงกระบวนการจริง
6. ระยะการติดตาม ควบคุมและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Control Phase)
- ก. หากผลการปรับปรุงเป็นที่น่าพอใจจะจัดทำวิธีการปฏิบัติงานใหม่ (Work Instruction) โดยตั้งค่าปัจจัยตามที่ได้จากการทดลอง
 - ข. จัดทำวิธีควบคุมและระบุในแผนควบคุม (Control Plan)

ค. ทดสอบยืนยันผลตามวิธีการปฏิบัติงาน (Work Instruction) และวิธีควบคุมในแผนควบคุม โดยเก็บข้อมูลตัวแปรตอบสนองภายหลังการปรับปรุงเป็นระยะเวลา 2 เดือน

7. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ
8. จัดทำรูปเล่มรายงานวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma)

2.1.1 ประวัติและความเป็นมา

ในปี ค.ศ.1988 มิเกล เจ แฮร์รี่ (Mikel J. Harry) เป็นแกนนำในการก่อตั้งและพัฒนาให้มีการใช้กระบวนการซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ภายในบริษัทโมโตโรลา (Motorola) โดยเริ่มจากการนำกระบวนการดังกล่าวมาใช้เป็นกลยุทธ์ในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์และลดต้นทุน จนทำให้องค์กรประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก หลังจากนั้นก็มีอีกหลากหลายบริษัทได้นำ ซิกซ์ ซิกมา ไปประยุกต์ใช้ อาทิ บริษัทออลลี (Allied Signal) บริษัทโซนี่ (Sony) และบริษัทเจเนอรัลอิเล็กทริก (General Electric: GE) ซึ่งบริษัทจีอีมีการประยุกต์ปรับแก้รูปแบบให้เป็นลักษณะของ Project Based Approach เพิ่มเติม กล่าวคือ จะเน้นทำเป็นเรื่องๆ โดยที่เรื่องหนึ่งใช้เวลาประมาณ 6 เดือน นอกจากนี้ยังมีการเสนอให้แก่คณะผู้บริหารทุกระดับได้เล็งเห็นความสำคัญของกระบวนการซิกซ์ ซิกมาด้วย

ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ใช้สัญลักษณ์ภาษากรีกว่า σ เป็นเครื่องหมายที่ใช้ในการวัดความแปรปรวนหรือการกระจายตัวของข้อมูลที่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าเฉลี่ยมาตรฐาน (Mean) ซึ่งจะทำให้ทราบระดับความผันแปรของกระบวนการ โดยที่ระดับของความผันแปรของกระบวนการได้จากการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดเฉพาะ (Specification Limits) ถ้าข้อมูลตัวใดมีค่าออกนอกข้อกำหนดเฉพาะ จะถือว่าข้อมูลตัวดังกล่าวมีความบกพร่อง (Defect) นั่นหมายความว่ากระบวนการมีความผิดปกติเกิดขึ้น ดังนั้นจึงนำซิกซ์ ซิกมามาใช้เพื่อลดความบกพร่องนั้น โดยจะมุ่งเน้นให้เกิดความบกพร่องน้อยที่สุด และมีความสูญเสียได้ไม่เกิน 3.4 หน่วยในล้านหน่วย หรือลดโอกาสในการเกิดความสูญเสียลงให้เหลือเพียง 3.4 หน่วยนั่นเอง (Defect per Million Opportunities: DPMO)

2.1.2 ความหมายของซิกซ์ ซิกมา

มิเกล เจ แฮร์รี่ (Mikel J. Harry) ได้ให้คำจำกัดความของกระบวนการซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ว่าเป็นกระบวนการพัฒนาระบบคุณภาพแบบหลายมิติ ประกอบด้วยรูปแบบที่เป็นมาตรฐาน การจัดการที่เหมาะสม และการตอบสนองภารกิจขององค์กร ซึ่งทำให้ทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภคพึงพอใจกับผลตอบแทนทั้งสองฝ่าย ทั้งทางด้านอัตราประโยชน์ ทรัพยากร และคุณค่าของผลิตภัณฑ์

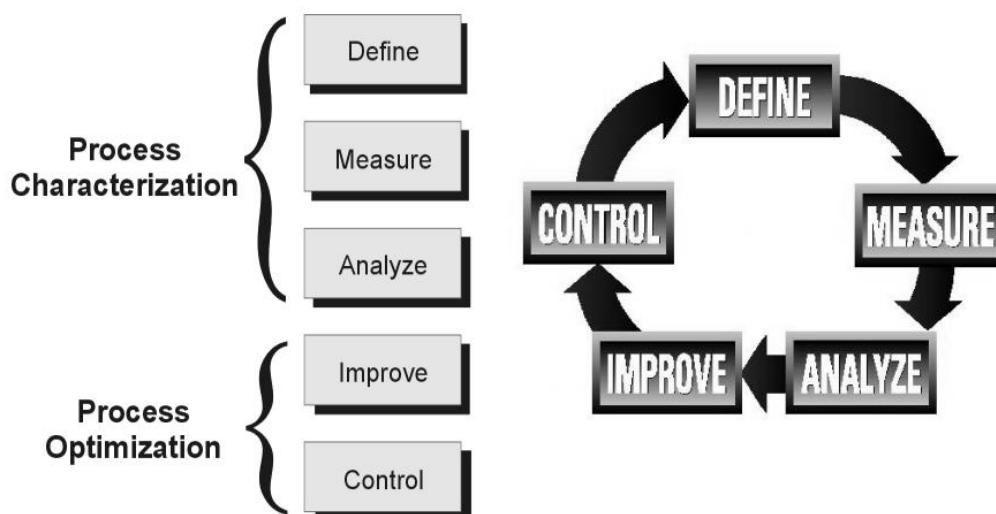
กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ [4] กล่าวถึง ชิکش ชิกมา ว่าเป็นวิธีการในการปรับปรุงคุณภาพระยะยาวสำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ ได้รับการพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกโดยสถาบันวิจัยของบริษัท โมโตโรลา การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการชิکش ชิกมานั้นจะต้องผ่านการประเมินถึงโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Defect per Million Opportunities: DPMO) หรือที่เรียกว่า การคำนวณดัชนีความสามารถของกระบวนการ Cp และ Cpk ดังนั้นคำว่า ชิکش ชิกมา มาจากการที่ระดับคุณภาพนั้นสามารถลดความผันแปรได้ในระยะยาว จนทำให้โอกาสในการเกิดข้อบกพร่องมีค่าเท่ากับ 3.4 ppm

Cavanaugh [5] กล่าวว่า จุดประสงค์ของการใช้ ชิکش ชิกมา คือ การปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือการบริการลูกค้า เพื่อให้ผลิตภัณฑ์หรือการบริการลูกค้าเข้าใกล้ความสมบูรณ์แบบมากที่สุด หรืออีกมุมมองหนึ่งในทางสถิติ นั่นคือ ลดความแปรปรวน (Variance) เพื่อให้เกิดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) น้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หรือการบริการได้รับการปรับปรุงจนเข้าใกล้ความสมบูรณ์แบบมากที่สุด ถ้าหากปรับปรุงให้เป็นดังนั้นก็จะทำให้คุณค่าของผลิตภัณฑ์หรือการบริการลูกค้ามีค่าเท่ากับหรือเหนือกว่าความคาดหวังของผู้ผลิตและลูกค้า ดังนั้นกระบวนการ ชิکش ชิกมา จะช่วยปรับปรุงระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือการบริการให้มีคุณภาพสูงขึ้น

2.1.3 ขั้นตอนและการประยุกต์ใช้

ขั้นตอนการดำเนินงานของชิکش ชิกมา สามารถนำไปปรับประยุกต์ใช้ได้หลายวัตถุประสงค์ แต่วัตถุประสงค์หลักของชิکش ชิกมา คือ การลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์และกระบวนการ โดยมีแนวคิดหลักว่า มุ่งเน้นแก้ไขปรับปรุงกระบวนการ (Process Improvement) อย่างเป็นขั้นตอน เริ่มจากการมองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Key Process Output Variables: KPOVs) หรือ $y = f(x)$ ซึ่งการจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง y และ x มานั้น จำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลและวิธีการทางสถิติมาวิเคราะห์ การปรับปรุงคุณภาพโครงการหนึ่งนั้น จะต้องอาศัยโครงสร้างที่เอื้อให้มีบุคลากรที่พร้อมจะดำเนินการ จึงต้องกำหนดบทบาทและความรับผิดชอบของบุคลากรไว้เป็นตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าโครงการที่จะทำการปรับปรุงนั้นมีโอกาสที่จะประสบความสำเร็จ นอกจากนี้จะต้องกำหนดเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดของโครงการการปรับปรุงอย่างชัดเจน

หลักการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางชิکش ชิกมานั้นประกอบไปด้วยกระบวนการ DMAIC คือกระบวนการในการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.1 จะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.1 กระบวนการในการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง DMAIC

1) ขั้นตอนการนิยามปัญหาหรือการระบุปัญหา (Define Phase)

ในขั้นตอนนี้จะระบุสภาพปัญหา ขอบเขต วัตถุประสงค์ เงื่อนไข และสมมติฐานของโครงการปรับปรุงคุณภาพหรือการออกแบบ ทั้งนี้จะเน้นถึงความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก เพื่อให้โครงการที่เลือกจะมาเป็นเรื่องสำคัญจริงๆ เมื่อทำแล้วต้องคุ้มค่าและไม่เสียเวลาไปเปล่าประโยชน์ นอกจากนี้จะต้องกำหนดทีมงานของโครงการในขั้นตอนนี้ด้วย

2) ขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure Phase)

ในขั้นตอนนี้จะมีการเก็บข้อมูลเพื่ออธิบายสภาพปัญหา และข้อมูลดังกล่าวจะช่วยกำหนดสาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหา ข้อมูลดังกล่าวจะนำมาวัดความสามารถของกระบวนการ วัดประสิทธิผล ฯลฯ

3) ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา (Analyze Phase)

ในขั้นตอนนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อค้นหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อปัญหา (Key Process Variables) ขั้นตอนนี้มีความสำคัญมากเพราะถ้าหากหาตัวแปรไม่เจอหรือหาผิดก็ไม่สามารถปรับปรุงได้ หรือปรับปรุงผิดที่ จำนวนของสาเหตุหรือตัวแปรที่เป็นไปได้อาจมีจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องกรองจำนวนของสาเหตุหรือปัจจัยลงก่อน โดยนำไปทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าสาเหตุหรือปัจจัยนั้นมีความสำคัญต่อปัญหาจริง จะได้นำไปปรับปรุงให้ตรงจุดในขั้นตอนต่อไป โดยในขั้นตอนนี้จะต้องทำการออกแบบการทดลองด้วย

4) ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve Phase)

หลังจากทราบสาเหตุหรือปัจจัยใดมีนัยสำคัญต่อปัญหาแล้ว จะนำปัจจัยหรือสาเหตุที่สามารถปรับตั้งค่าได้มาทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุด หากเป็นปัจจัยหรือสาเหตุที่สามารถปรับปรุงได้โดยไม่ต้องทำการทดลอง ก็จะกำหนดทางเลือกในการปรับปรุงและเลือกทางเลือกที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลพิจารณาประกอบการตัดสินใจ

5) ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase)

หลังจากได้วิธีการปรับปรุงแล้ว ก็จะเป็นการจัดทำวิธีควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อให้กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลลัพธ์นั้นดีขึ้นหลังการปรับปรุงและจะอยู่ยั่งยืนต่อไป

2.2 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methods)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methods: RSM) คือ การรวบรวมเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการสร้างรูปแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจศึกษานั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยวิธีการดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อจะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่างๆที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าที่ต้องการ โดยการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์นี้มีหลายแบบการทดลองด้วยกัน เช่น การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) การออกแบบเฟซ-เซ็นเตอร์เซ็นทรัลคอมโพสิท (Face Centered Central Composite) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) เป็นต้น [6] ในงานวิจัยนี้การออกแบบการทดลองที่เลือกใช้คือ การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3 - level design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแบบเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factors) เช่น เวลา ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น ลักษณะการออกแบบวิธีออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะใช้หลักการของ 2^k การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบบวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Point) รวมเข้าไป จึงทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ 3^k การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยที่ k คือ จำนวนปัจจัย อีกทั้งยังมีค่า Resolution เท่ากับ IV ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ แต่เมื่อเทียบกับการออกแบบส่วนประสมกลางในกรณีที่จำนวนปัจจัยที่ศึกษามีมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป จะทำให้การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนมีประสิทธิภาพดีต่อยกกว่า เนื่องจากมีจำนวนครั้งที่ทดลอง (Number of Runs) มากกว่าและไม่สามารถลดได้ [7]

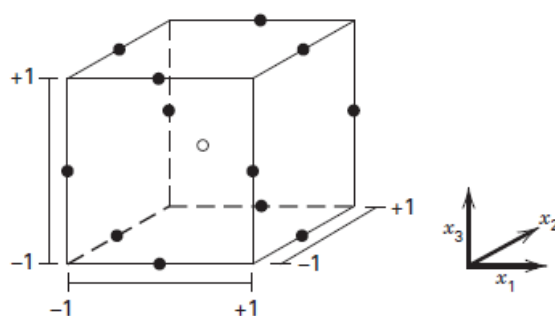
2.2.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

Box and Behnken เสนอการออกแบบการทดลองที่มี 3 ระดับ รูปที่ 2.2 สำหรับพื้นผิวตอบ ผลตอบ การออกแบบถูกสร้างขึ้นจากการรวมกันระหว่างการออกแบบ 2^k แฟคทอเรียล (2^k Factorials) และการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ (Incomplete Block Designs) ผลจากการออกแบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากในเรื่องของจำนวนครั้งของการทดลอง (Runs) รูปที่ 2.3 และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

Run	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

รูปที่ 2.2 สถานะการทดลอง (Treatments)

ของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ตัวแปร



รูปที่ 2.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย

จากรูป 2.2 แสดงการออกแบบบ็อกซ์ - เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว การออกแบบเป็นรูป ลูกบาศก์ดังแสดงในรูป 2.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าการออกแบบบ็อกซ์ - เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูป

วงกลมที่มีจุดทุกจุดอยู่ภายในวงกลมที่มีรัศมี $\sqrt{2}$ การออกแบบนี้ไม่ได้รวมจุดบางจุดที่เส้นตั้งตรงขอบเขตลูกบาศก์ สร้างได้โดยใช้ขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างสำหรับแต่ละตัวแปร สิ่งนี้เป็นข้อได้เปรียบเมื่อจุดต่างๆบนมุมของลูกบาศก์แสดงการรวมกันของระดับปัจจัยซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะทดสอบเนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการทางกายภาพ [8]

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis)

ธนากร เกียรติบรรลือ [9] ได้ให้ความหมายของ การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ว่าเป็นการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องที่และผลกระทบที่เกิดขึ้น โดย FMEA จะเป็นเทคนิคทางวิศวกรรมที่ใช้ในการกำหนดการบ่งชี้ และการขจัดปัญหา ความล้มเหลว และความผิดพลาดต่างๆที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบงานของการออกแบบกระบวนการ และการบริการก่อนที่จะถึงมือลูกค้า โดยข้อบกพร่องดังกล่าวอาจอยู่ในรูปของปัญหาหรือความคลาดเคลื่อนได้

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) เป็นหนึ่งในเทคนิคการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่ได้การรับรองจากมาตรฐานสากล อาทิ สมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of Automotive Engineer) กระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา (US Military of Defense) และ Automotive Industry Action Group (AIAG) เป็นต้น [10] ซึ่ง FMEA เป็นเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อทศวรรษที่ 1950 โดยหน่วยงานอากาศยานทางทหารของสหรัฐอเมริกา อันได้แก่ กองทัพอากาศ กองทัพเรือ องค์การ NASA ต่อมาได้มีการนำวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวไปปรับประยุกต์ใช้ที่บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ชั้นนำของโลก ได้แก่ Ford Motor, GM และ Chrysler หรือที่รู้จักกันในนามว่า BIG THREE (Big 3) ซึ่งในปัจจุบันนี้วิธีการวิเคราะห์ FMEA ได้ถูกนำมาใช้เป็นข้อกำหนดพื้นฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์

2.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ [11]

มีลักษณะสำคัญ 3 ประการ ดังต่อไปนี้

- 1) ระบุและประเมินถึงข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้น (Potential Failure Mode) ของผลิตภัณฑ์/กระบวนการหนึ่งและผลกระทบ (Effect)
- 2) บ่งชี้การปฏิบัติการที่สามารถกำจัดทิ้งหรือลดโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่องและ
- 3) การดำเนินการของกระบวนการถูกจัดเก็บอยู่ในแบบฟอร์มมาตรฐาน

2.3.2 ประเภทของการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ มี 4 ประเภท ดังนี้

- 1) Concept FMEA (CFMEA) การวิเคราะห์ระบบและระบบย่อยต่างๆในขั้นตอนการออกแบบแนวคิด เน้นการวิเคราะห์แนวโน้มที่จะเกิดข้อบกพร่องในการทำงาน (Function) ของระบบ รวมถึงศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกับองค์ประกอบต่างๆของระบบด้วย
- 2) Design FMEA (DFMEA) การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในขั้นตอนของการออกแบบผลิตภัณฑ์ ก่อนที่จะดำเนินการผลิต
- 3) Process FMEA (PFMEA) ทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของกระบวนการออกแบบการผลิตและกระบวนการประกอบ
- 4) Service FMEA (SFMEA) การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในขั้นตอนของการออกแบบกระบวนการบริการก่อนที่จะส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้า

2.3.3 ขั้นตอนการจัดทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิต

ขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ จะอยู่ในช่วงการดำเนินการของการออกแบบแนวคิด ซึ่งจะต้องจัดตั้งทีม FMEA ขึ้นมาโดยบุคคลในทีมควรเป็นบุคคลที่มาจากแผนกที่แตกต่างกัน เพื่อให้ความคิดที่ได้จากการระดมสมองมีความแตกต่างหลากหลายมากยิ่งขึ้น อีกทั้งจะทำให้กระบวนการในการแก้ไขปัญหาสามารถทำได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อันเนื่องมาจากบุคคลภายในทีมมีองค์ความรู้ที่แตกต่างกัน ซึ่งถ้าหากจัดทำการวิเคราะห์มีการลำดับเป็นขั้นตอนได้แล้ว จะทำให้การระบุข้อบกพร่องของการออกแบบมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยขั้นตอนการจัดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดกลยุทธ์ในการจัดทำการวิเคราะห์

การจัดทำ FMEA เป็นเรื่องละเอียดอ่อนมาก ดังนั้นการจัดทำการวิเคราะห์จะต้องทำทุกๆกระบวนการดำเนินงาน ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการผลิตหรือกระบวนการประกอบ โดยจะต้องพิจารณาถึงในส่วนที่แทบจะเป็นไปไม่ได้ที่เกิดข้อบกพร่องเลย จึงทำให้ขั้นตอนนี้ใช้เวลาในการจัดทำค่อนข้างมาก สุดท้ายจึงเลือกกระบวนการบางกระบวนการขึ้นมาเพื่อดำเนินการแก้ไข

2. การทบทวนกระบวนการ

ทำความเข้าใจกับกระบวนการที่เลือกมาจากขั้นตอนที่ 1 อาจจะทำทำความเข้าใจกระบวนการแล้วจัดทำเป็นแผนภาพแสดงการไหลของกระบวนการ (Process Flow Map) ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจกระบวนการผลิตในทุกขั้นตอนมากยิ่งขึ้น

ในขั้นตอนนี้สมาชิกภายในทีมจะต้องศึกษาทำความเข้าใจกระบวนการที่จะทำการแก้ไขมาเป็นอย่างดี เพื่อให้เข้าใจหน้าที่ แนวคิด และจุดประสงค์ของการปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอน จากนั้นจึงค้นหาความผิดปกติและข้อบกพร่องของกระบวนการว่าทำไมจึงผิดจากจุดประสงค์ที่เราออกแบบไว้ในตอนต้น

3. การระดมสมองค้นหาลักษณะของข้อบกพร่อง

ก่อนที่จะมีการระดมสมองนั้นสมาชิกในทีมทุกคนจะต้องเข้าใจหน้าที่ แนวคิด และจุดประสงค์ในการปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการแล้ว เพื่อกำหนดลักษณะข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้นได้ (Potential Failure Mode) โดยให้สมาชิกทุกคนภายในทีมมีอิสระในการใช้ความรู้ความเข้าใจที่มีเพื่อทำการวิเคราะห์หน้าที่ของแต่ละขั้นตอนของกระบวนการว่ามีข้อบกพร่องใดที่อาจจะเกิดขึ้นได้

4. การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องแต่ละรายการ

หลังจากการระดมความคิดเพื่อหาข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้นได้ร่วมกันภายในทีมแล้ว จะเริ่มทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องแต่ละรายการ โดยเริ่มจากการพิจารณาผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับลูกค้าก่อน โดยพิจารณาว่าประโยชน์ใช้สอยของผลิตภัณฑ์ลดลงหรือไม่ ต่อจากนั้นจึงดูว่ามีความรุนแรง (Severity: S) จากผลกระทบดังกล่าวหรือไม่ มีความรุนแรงมากน้อยแค่ไหน กล่าวคือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลูกค้าและเปลี่ยนแปลงการใช้งานหรือไม่

ต่อจากนั้นจึงพิจารณาถึงสาเหตุของการเกิดลักษณะข้อบกพร่อง โดยสาเหตุจะต้องพิจารณามาจากแนวคิดและจุดประสงค์การทำงานของกระบวนการ เมื่อทราบสาเหตุแล้วจึงทำการประเมินถึงโอกาสและความถี่ของการเกิดสาเหตุนั้น (Occurrence: O)

ในส่วนสุดท้ายนี้จะพิจารณาก็ต่อเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบและสาเหตุแล้ว ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงระบบการควบคุมและตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการในปัจจุบันที่ใช้อยู่ เพื่อที่จะได้รู้ว่าระบบการควบคุมและตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการมีความสามารถในการตรวจจับมากหรือน้อยแค่ไหน และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นแล้วระบบดังกล่าวจะมีความสามารถในการบ่งชี้ข้อบกพร่องก่อนที่จะส่งผลิตภัณฑ์ถึงมือลูกค้าได้ตีเพียงใด หลังจากนั้นจึงทำการประเมินถึงความสามารถในการตรวจจับ (Detection: D) ของระบบ

5. การประเมินตัวเลขแสดงลำดับความสำคัญของความเสี่ยง

ภายหลังจากการทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องแต่ละรายการแล้ว ต่อมาจะทำการพิจารณาและประเมินถึงองค์ประกอบ 3 ประการ ได้แก่

ความรุนแรงของผลกระทบ (Severity of Effect: S) ถ้าหากลักษณะข้อบกพร่องเกิดขึ้น ให้ประเมินว่ามีความรุนแรงของผลกระทบอันเนื่องมาจากข้อบกพร่องดังกล่าวมากน้อยเพียงใด โดยคะแนนของความรุนแรงที่เกิดขึ้นสามารถดูได้จากเกณฑ์การให้คะแนน ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1 [12]

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของข้อบกพร่อง (AIAG)

ผลกระทบจากข้อบกพร่อง	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อผู้ใช้ผลิตภัณฑ์	เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อกระบวนการภายใน	คะแนน
เกิดอันตรายโดยไม่มี การเตือน	มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้หรือขัดต่อกฎหมายโดยไม่มี การเตือนล่วงหน้า	มีผลกระทบต่อ การเกิดอันตรายต่อพนักงาน (หรือเครื่องจักร) โดยไม่มี การเตือนล่วงหน้า	10
เกิดอันตรายโดยมี การเตือน	มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้หรือขัดต่อกฎหมายโดยมี การเตือนล่วงหน้า	มีผลกระทบต่อ การเกิดอันตรายต่อพนักงาน (หรือเครื่องจักร) โดยมี การเตือนล่วงหน้า	9
มีผลกระทบสูงมาก	ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถใช้งาน ได้เนื่องจากสูญเสียหน้าที่หลัก	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (100%) อาจต้อง ถูกทำลายหรือส่งเข้าซ่อมแซมบำรุง โดยใช้เวลามากกว่า 1 ชั่วโมง	8
มีผลกระทบสูง	ผลิตภัณฑ์นำไปใช้งานได้ แต่ระดับสมรรถนะลดลงจนทำให้ลูกค้าไม่พอใจมาก	อาจมีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบ คัดเลือก (Sorting) และผลิตภัณฑ์ บางส่วน (น้อยกว่า 100%) อาจถูก ทำลายหรือซ่อมแซมบำรุงระหว่าง ครึ่งถึงหนึ่งชั่วโมง	7
ผลกระทบปานกลาง	ผลิตภัณฑ์สามารถนำไปใช้ งานได้ แต่ขาดความ สะดวกสบายและทำให้ ลูกค้าไม่พอใจ	ผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) อาจถูกทำลายหรือถูก ซ่อมแซมที่แผนกซ่อมบำรุงต่ำกว่า ครึ่งชั่วโมง	6

ผลกระทบจาก ข้อบกพร่อง	ความรุนแรงของผลกระทบ ที่มีต่อผู้ใช้ผลิตภัณฑ์	เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของ ผลกระทบที่มีต่อกระบวนการ ภายใน	คะแนน
ผลกระทบต่ำ	ผลิตภัณฑ์นำไปใช้งานได้ ด้วยความสะดวกสบาย แต่ ระดับสมรรถนะลดลง	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (100%) อาจ ได้รับการ Rework หรือได้รับการ ซ่อมแซมนอกสายการผลิตที่ฝ่าย ผลิต	5
ผลกระทบต่ำมาก	ความเรียบร้อยของ ผลิตภัณฑ์ไม่ดีนัก ลูกค้ำส่วน ใหญ่ (มากกว่า 75%) สามารถสังเกตเห็น ข้อบกพร่อง	ผลิตภัณฑ์อาจได้รับการตรวจสอบ แบบคัดเลือก (Sorting) โดยไม่มี ผลิตภัณฑ์ที่ต้องถูกทำลาย แต่มี ผลิตภัณฑ์ (ต่ำกว่า 100%) อาจ ได้รับการ Rework	4
ผลกระทบ เล็กน้อย	ความเรียบร้อยของ ผลิตภัณฑ์ไม่ดีนัก ลูกค้ำ ประมาณครึ่งหนึ่งสามารถ สังเกตเห็นข้อบกพร่องได้	ผลิตภัณฑ์บางส่วน (ต่ำกว่า 100%) อาจต้องได้รับการ Rework ใน สายการผลิต แต่นอกจุดปฏิบัติงาน ที่ต้องถูกทำลาย	3
เกือบไม่มี ผลกระทบ	ความเรียบร้อยของ ผลิตภัณฑ์ไม่ดีนัก ลูกค้ำส่วน น้อย (ต่ำกว่า 25%) สามารถสังเกตเห็น ข้อบกพร่องได้	มีผลิตภัณฑ์บางส่วน ที่มีจำนวนต่ำ กว่า 100% อาจได้รับการ Rework ในสายการผลิต ที่จุดปฏิบัติงานโดย ไม่ถูกทำลาย	2
ไม่มีผลกระทบ	ไม่มีผลกระทบที่สังเกตเห็น	อาจมีความสะดวกสบายเล็กน้อยต่อ การปฏิบัติงาน หรือตัวพนักงาน หรือไม่มีผลกระทบใดๆ	1

โอกาสในการเกิด (Occurrence: O) ในที่นี้หมายถึงความถี่ในการเกิดลักษณะข้อบกพร่อง ซึ่ง
จะต้องพิจารณาถึงสาเหตุในการเกิดลักษณะข้อบกพร่องดังกล่าวแล้วจึงประเมินคะแนนจากตารางที่
2.2 [12]

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การประเมินผลโอกาสการเกิดขึ้นของข้อบกพร่อง (AIAG)

โอกาสในการเกิดขึ้นของสาเหตุหนึ่งๆ	อัตราข้อบกพร่องที่เป็นไปได้ (PPM)	Ppk	ลำดับ
สูงมาก: เกิดข้อบกพร่องเป็นประจำ	$\geq 100,000$ (หรือ 10%)	< 0.55	10
	50,000 (หรือ 5%)	≥ 0.55	9
สูง: เกิดข้อบกพร่องบ่อย	20,000 (หรือ 2%)	≥ 0.78	8
	10,000 (หรือ 1%)	≥ 0.86	7
ปานกลาง: เกิดข้อบกพร่องเป็นครั้งคราว	5,000 (หรือ 0.5%)	≥ 0.94	6
	2,000 (หรือ 0.2%)	≥ 1.00	5
	1,000 (หรือ 0.1%)	≥ 1.10	4
ต่ำ: เกิดข้อบกพร่องค่อนข้างน้อย	500	≥ 1.20	3
	100	≥ 1.30	2
ห่างไกล: เกือบไม่มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องเลย	≤ 10	≥ 1.67	1

การตรวจจับ (Detection: D) หมายถึง ความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงการควบคุมของกระบวนการในปัจจุบัน แล้วประเมินตามเกณฑ์การให้คะแนนจากตารางที่ 2.3 [12]

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การประเมินผลการตรวจจับของระบบควบคุม (AIAG)

ลักษณะการตรวจจับ	เกณฑ์	ประเภทการตรวจจับ			ขอบเขตวิธีการตรวจจับ	คะแนน
		A	B	C		
เกือบเป็นไปไม่ได้	ไม่มีระบบการตรวจจับใดๆ			X	ไม่สามารถตรวจจับหรือตรวจสอบได้	10
ห่างไกลมาก	มีระบบควบคุมแต่ไม่สามารถตรวจจับข้อบกพร่องได้			X	การควบคุมกระทำได้เพียงการสุ่มตรวจเท่านั้น	9

ลักษณะการ ตรวจจับ	เกณฑ์	ประเภทการ ตรวจจับ			ขอบเขตวิธีการตรวจจับ	คะแนน
		A	B	C		
ห่างไกล	มีระบบควบคุมแต่มี โอกาสน้อยมากที่จะ ตรวจจับข้อบกพร่องได้			X	การควบคุมกระทำ ได้ด้วยการตรวจสอบด้วย ตาเปล่าเท่านั้น	8
ต่ำมาก	มีระบบควบคุมแต่มี โอกาสน้อยมากที่จะ ตรวจจับข้อบกพร่องได้			X	การควบคุมกระทำ ได้ด้วยการตรวจสอบด้วย ตาเปล่าสองครั้งเท่านั้น	7
ต่ำ	มีระบบควบคุมและ อาจจะตรวจจับ ข้อบกพร่องได้		X	X	การควบคุมกระทำ ได้ด้วยแผนภูมิ SPC	6
ปานกลาง	มีระบบควบคุมและ อาจจะตรวจจับ ข้อบกพร่องได้		X		มีการควบคุมโดยใช้ เครื่องมือวัด วัดชิ้นงาน ก่อนออกจากจุด ปฏิบัติงานหรืออาจใช้ เกจ แบบ Go/No Go	5
ค่อนข้างสูง	มีระบบควบคุมและมี โอกาสสูงที่จะตรวจจับ ข้อบกพร่องได้	X	X		มีการตรวจสอบจับความ ผิดพลาดในกระบวนการ ถัดไปหรือมีการใช้ เครื่องมือวัดงานชิ้นแรก ในขั้นตอนการปรับตั้ง (Set Up)	4
สูง	มีระบบควบคุมและมี โอกาสสูงที่จะตรวจจับ ข้อบกพร่องได้	X	X		มีการตรวจสอบจับความ ผิดพลาดที่จุดปฏิบัติงาน หรือมีการตรวจจับความ ผิดพลาดโดยการ ตรวจสอบเพื่อการ ยอมรับ	3

ลักษณะการตรวจจับ	เกณฑ์	ประเภทการตรวจจับ			ขอบเขตวิธีการตรวจจับ	คะแนน
		A	B	C		
สูงมาก	มีระบบควบคุมและเกือบจะมั่นใจได้ว่าสามารถตรวจจับข้อบกพร่อง	X	X		มีการตรวจสอบจับความผิดพลาดที่จุดปฏิบัติงานหรือด้วยเครื่องมืออัตโนมัติ ชิ้นงานบกพร่องไม่สามารถผ่านไป	2
สูงมาก	มีระบบควบคุมและมั่นใจได้ว่าสามารถตรวจจับข้อบกพร่อง	X			ไม่มีโอกาสเกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องเพราะใช้ Poka Yoke ในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการ	1

ประเภทการตรวจจับ

A: การป้องกันข้อผิดพลาด

B: การใช้อุปกรณ์วัด (Gauging)

C: ตรวจสอบโดยอาศัยบุคคล (Manual Inspection)

จากนั้นจึงนำองค์ประกอบทั้ง 3 ประการมาคำนวณหาตัวเลขแสดงลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) ตามสมการด้านล่างนี้

$$RPN = S \times O \times D$$

โดย RPN คือตัวเลขแสดงลำดับความสำคัญของความเสี่ยง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1 – 1000 ค่า RPN ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญในการแก้ไขปัญหาลักษณะข้อบกพร่องตามแต่ละรายการ โดยอาศัยหลักการพาเรโต (Pareto Principle) ที่กำหนดให้ลักษณะข้อบกพร่องที่มีความสำคัญมีจำนวนเล็กน้อย (Vital Few Failure Modes) และลักษณะข้อบกพร่องที่มีความสำคัญเล็กน้อยจะมีจำนวนมาก (Trivial Many Failure Modes) ดังนั้น ค่า RPN ที่มีค่าสูงๆ จะต้องดำเนินการปฏิบัติการแก้ไขเพื่อลดค่า RPN ให้ลดลง

6. การกำหนดมาตรการตอบโต้เพื่อลดความเสี่ยง

หลังจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงแล้ว ให้ทำการเลือกข้อบกพร่องที่มีความรุนแรงของลักษณะข้อบกพร่องและ/หรือความเสี่ยงในการเกิดข้อบกพร่องมากขึ้นมาพิจารณา แล้วดำเนินการหามาตรการตอบโต้เพื่อลดความรุนแรงลงก่อนที่จะดำเนินการกับสาเหตุรากเหง้าต่อไป

7. การประเมินผลความเสี่ยงภายหลังการปฏิบัติการตอบโต้

หลังจากการใช้มาตรการตอบโต้แล้ว ควรจะต้องทำการประเมินค่าความเสี่ยง RPN อีกครั้งหนึ่ง โดยอาศัยหลักเกณฑ์เดิม เพื่อพิจารณาว่าความเสี่ยงของลักษณะข้อบกพร่องได้ลดลงหรือไม่ ถ้าหากไม่ลดลงให้พิจารณาอีกครั้งหนึ่งว่ามาจากสาเหตุใดแล้วดำเนินการแก้ไขต่อไป

8. การติดตามผลและจัดทำมาตรฐาน

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการจัดทำ FMEA โดยจะทำการติดตามผลเพื่อพิจารณาว่ามาตรการตอบโต้ที่กำหนดไว้มีประสิทธิภาพหรือไม่ ถ้ามีประสิทธิภาพแล้วควรจะมีการจัดทำเป็นมาตรฐานต่อไป

2.4 วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือ และความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน

ความเข้มข้นของเกลือในที่นี้ หมายถึง ความเข้มข้นของเกลือในสารซัลโฟลานที่ผ่านกระบวนการกลั่นแบบธรรมดา (Simple Distillation) ทั้งจากการกลั่นที่เครื่องกลั่นระเหยแห้งและเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง โดยโรงงานกรณีศึกษานี้กำหนดให้ความเข้มข้นของเกลือในน้ำต้องน้อยกว่า 1% ถึงจะสามารถนำไปใช้ผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ในรอบการผลิตต่อไปได้ทันที

ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือ โดยใช้วิธีการกรองแบบลดความดัน (Vacuum Filtration) ระบบการกรอง (Filtration System) ดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กออกจากสารละลาย ซึ่งในที่นี้คือ เกลือโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) และเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีสถานะเป็นของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายออกจากของเหลว ซึ่งก็คือสารซัลโฟลานโดยตัวกรองที่ใช้คือ กระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกันไป รูในที่นี้คือขนาดของอนุภาคที่จะสามารถผ่านไปได้ ซึ่งปัจจุบันใช้กระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 20 ไมโครเมตร ตัวกรองนี้จะต่อเข้ากับชุดกรอง ได้แก่ ขวดลดความดัน (Suction Flask) และชุดยึดเมมเบรน (Filter Holder) เนื่องจากการกรองอนุภาคขนาดเล็ก หากใช้ระบบการกรองแบบทั่วไปจะใช้เวลาในการกรองนานมาก ดังนั้นต้องใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) เข้ามาช่วยในการกรอง โดยต่อเข้ากับแขนของขวดลดความดัน ภายในขวดลดความดันความดันจะน้อยลง ทำให้ความดันอากาศจากภายนอกดันสารละลายที่อยู่ด้านบนผ่านกระดาษกรองลงมาเก็บในขวดลดความดันได้อย่างรวดเร็ว

จากนั้นคำนวณปริมาณเกลือ ในหน่วยกิโลกรัมต่อสารละลายโซลโฟลาน 100 กิโลกรัม แล้วจึงพิจารณาว่าน้อยกว่าความเข้มข้นของเกลือที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งถ้าหากมากกว่า 1% จะต้องนำมารวมในถังตกตะกอน เพื่อเข้าสู่กระบวนการกลั่นอีกครั้งหนึ่งในรอบการผลิตถัดไป แต่เนื่องจากวิธีการกรองดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องกล่าวคือ ภายหลังจากการกรองพบว่าสารโซลโฟลานบางส่วนยังไม่ลงมาในขวดลดความดัน

สำหรับการตรวจสอบความเข้มข้นของสารโซลโฟลานในเกลือที่กลั่นเสร็จใช้วิธีการกรองแบบเดียวกับการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือในสารโซลโฟลาน แต่แตกต่างกันที่การคำนวณ ความเข้มข้นของสารโซลโฟลานจะคำนวณปริมาณสารโซลโฟลาน ในหน่วยกิโลกรัมต่อเกลือ 100 กิโลกรัม แทน แล้วจึงพิจารณาว่าน้อยกว่าความเข้มข้นของสารโซลโฟลานที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งถ้าหากมากกว่า 3% จะต้องนำไปรวมในเครื่องกลั่นแห่งแนวตั้งเพื่อเข้าสู่กระบวนการกลั่นอีกครั้งในรอบการผลิตถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารโซลโฟลานกลับคืน

จากที่กล่าวในบทที่ 1 ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งขั้นตอนภายในกระบวนการนำสารโซลโฟลานกลับคืนออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก และกำหนดขอบเขตการศึกษาเฉพาะในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 1 คือ การรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในตัวทำละลายโซลโฟลานจากถังพักมายังถังตกตะกอนจนกระทั่งสารล้นออกไป ภายในขั้นตอนดังกล่าวมีปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารโซลโฟลานกลับคืน ดังต่อไปนี้ “อัตราการไหลของสาร” Goula [13] ได้กล่าวว่าการเพิ่มจำนวนอนุภาคขนาดเล็กในถังตกตะกอนนั้นจะทำให้ความเข้มข้นของสารเพิ่มมากขึ้น และถ้าหากปล่อยสารดังกล่าวด้วยอัตราการไหลที่เร็ว จะทำให้สารนั้นไหลพรวดลงไปยังถังที่เหมือนกับน้ำตก เช่นเดียวกันกับการปล่อยสาร NaCl-Sul ไปยังถังตกตะกอน ดังนั้นถ้าหากต้องการให้รอบเวลาของกระบวนการนำสารโซลโฟลานกลับคืนลดลงนั้น สามารถควบคุมอัตราการไหลให้เร็วได้ แต่ต้องไม่ทำให้ของแข็งที่รวมตัวอยู่บริเวณก้นถังก่อนหน้านั้นฟุ้งกระจาย ปัจจัยต่อมาคือ “ความเร็วใบพัด” Riger และ Dittl [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในถังผสมซึ่งมีการคนสารตลอดระยะเวลาปฏิบัติงาน โดยศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง Modified Froude Number กับความเร็วใบพัดที่ใช้ในการกวนสาร ซึ่งค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการด้านล่างนี้

$$Fr' = \frac{n^2 dp}{g \Delta \rho}$$

โดยที่	Fr'	คือ	Modified Froude Number
	g	คือ	ความเร่งโน้มถ่วง (m/s^2)

n	คือ	ความเร็วใบพัด (1/s)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
$\Delta\rho$	คือ	ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของ ของแข็งและของเหลว (kg/m^3)

ดังนั้นจากสมการของ Modified Froude Number จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Modified Froude Number และความเร็วใบพัดว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเพิ่มความเร็วใบพัดขึ้นแล้ว Froude Number ก็เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ Froude Number ยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของของเหลว/ของแข็ง และความเร่งโน้มถ่วงด้วย สำหรับการปรับตั้งค่าความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนในขั้นตอนที่ 1 ของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน คือ กวนสาร NaCl-Sul ให้เข้ากัน โดยที่ไม่ทำให้อนุภาคของของแข็งฟุ้งกระจาย ตั้งแต่เริ่มปล่อยสารจากถังพักจนกระทั่งสารหมดถังพัก ทั้งนี้เราสามารถคาดการณ์ความฟุ้งกระจายของอนุภาคของของแข็งภายในถังตกตะกอนได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Modified Froude Number กับความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง [15]

$$Fr' = \frac{n^2 d_p}{g \Delta \rho} = f\left(\frac{d_p}{D}, c_v\right) = A_1 \left(\frac{d_p}{D}\right)^a$$

โดยที่	d_p	คือ	ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
	D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังภาชนะ
	c_v	คือ	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของของแข็ง
	A_1, a	คือ	สัมประสิทธิ์ของสมการที่ขึ้นอยู่กับ c_v

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เมื่อมีความเข้มข้นของอนุภาคสูงขึ้นต้องใช้แรงในการกวนสารเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าหากต้องการลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลาน จะต้องปรับค่าความเร็วใบพัดให้เหมาะสมกับขนาดของอนุภาคของสาร NaCl-Sul

ขั้นตอนที่ 3 คือ การกลั่นที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง ซึ่งเป็นการกลั่นโดยการลดความดัน (Vacuum Distillation) เพื่อแยกสารซัลโฟลานออกจากเกลือ ขั้นตอนดังกล่าวใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง/รอบการผลิต ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของกระบวนการนาน ดังนั้นจึงต้องลดระยะเวลาของขั้นตอนนี้ลง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนนี้คือ ความดันอากาศ อุณหภูมิ และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง ใบพัดของเครื่องกลั่นนี้มีรูปร่างเป็นเกลียวยาว เพื่อทำหน้าที่ในการขูดเกลือที่ติดค้างบริเวณด้านข้างให้ลงมารวมกับเกลือที่อยู่ก้นเครื่องกลั่นพร้อมกับทำหน้าที่ในการกวนเกลือเพื่อให้สารซัลโฟลานที่ยังหลงเหลืออยู่ระเหยขึ้นไป การกลั่นเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายใน

การทำให้อุณหภูมิของเหลวบริสุทธิ์ กระบวนการกลั่นแบบปกติที่นั้นเกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนกับของเหลว เมื่อถึงจุดเดือดของของเหลวนั้นจะทำให้ระเหยกลายเป็นไอ ต่อจากนั้นไอนี้จะผ่านการระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water - Cooled Condenser) เพื่อให้ไอนี้เปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงนำของเหลวนี้ไปกักเก็บ แต่ในโรงงานกรณีศึกษาได้ทำการลดความดันอากาศลง เพื่อให้จุดเดือดของสารซัลโฟลานลดลง ซึ่งจะทำให้รอบเวลาของกระบวนการลดลงด้วยปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาภายในขั้นตอนการกลั่นที่ 3 นี้ ได้แก่ ระบบควบคุมความดันอากาศ (Pressure Control System) โดยจะควบคุมความดันอากาศให้น้อยกว่าความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเล (Vacuum Operation) ซึ่งจะต้องดูเงื่อนไขของอุณหภูมิร่วมด้วย เพราะอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศกับอุณหภูมิเป็นไปตามสมการของ Antoine Equation [16, 17] โดยสมการมีความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$\log P = A - \frac{B}{(T + C)}$$

โดยที่ P คือ ความดันไอของสารนั้นๆ

T คือ อุณหภูมิจุดเดือดของสารนั้นๆ

A, B, C คือ ค่าคงที่ของ Antoine Constants

จากสมการนี้จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการระเหยของสารที่ความดันแตกต่างกันไป ถ้าสารนั้นมีความดันไอมากหรืออุณหภูมิต่ำ จุดเดือดต่ำจะทำให้สารนั้นระเหยง่ายและมีสัดส่วนขององค์ประกอบในส่วนที่เป็นแก๊สมาก ส่วนสารใดที่มีความดันไอน้อยหรืออุณหภูมิต่ำ จุดเดือดสูง สารนั้นจะระเหยยากและมีสัดส่วนขององค์ประกอบในไอน้อยแต่จะมีสัดส่วนขององค์ประกอบในของเหลวมาก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไซยานูริกพลูออไรด์

ในอุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมผ้าฝ้ายนั้น มีกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน ตั้งแต่เริ่มสังเคราะห์หมู่เกาะผ้าไปจนถึงการทำสีย้อมผ้าฝ้ายให้ได้คุณภาพตามที่ต้องการ ซึ่งแต่ละขั้นตอนต้องใช้สารเคมีหลายชนิดในการผลิต ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียงขั้นตอนการผลิตหมู่เกาะผ้า ภายในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาแยกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการผลิตไซยานูริกพลูออไรด์และกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน ตามลำดับ โดยขอบเขตของงานวิจัยนี้คือ กระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน ดังที่กล่าวในบทที่ 1 แต่กระบวนการผลิตไซยานูริกพลูออไรด์มีความเกี่ยวเนื่องกับ

บทที่ 3

การศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึง การจัดตั้งคณะทำงานและขั้นตอนการทำงานของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของวิธีการของซิกซ์ ซิกมา เรียกว่า ขั้นตอนการนิยามปัญหา (Define Phase) และการรวบรวมข้อมูล ที่จะนำไปสู่การกำหนดจุดเริ่มต้นและทิศทางของงานวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การจัดตั้งทีมงาน

การจัดตั้งทีมงานในครั้งนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อปรับปรุง สนับสนุนการทดลอง และระดมความคิดที่จะใช้ในการวิจัยถึงปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลากระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนของโรงงานกรณีศึกษาดังกล่าว เพื่อให้การดำเนินงานบรรลุเป้าหมายที่กำหนดไว้ จึงจัดตั้งบุคลากรจากหน่วยงานขึ้นเป็นทีมงานในการปรับปรุงโครงการนี้ ดังต่อไปนี้

1. ผู้จัดการฝ่ายผลิตโรงงานสังเคราะห์พิเศษ (SSU Plant Production's Manager)

ผู้จัดการฝ่ายผลิตโรงงานสังเคราะห์พิเศษมีหน้าที่จัดการการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตทั้งหมดให้อยู่ในการควบคุม ซึ่งจะประสานงานกับฝ่ายจัดเก็บวัตถุดิบ ฝ่ายจัดการของเสีย และฝ่ายจัดเก็บสินค้าคงคลัง นอกจากนั้นจะต้องทำการค้นหา/วิเคราะห์สาเหตุรากเหง้า และปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานภายในโรงงานสังเคราะห์พิเศษให้ถูกต้องเมื่อมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น

2. หัวหน้างานโรงงานสังเคราะห์พิเศษ (SSU Plant's Supervisor)

หัวหน้างานโรงงานสังเคราะห์พิเศษมีหน้าที่ยืนยันผลการดำเนินงานตลอดเวลา รับผิดชอบการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและสถานการณ์ที่ไม่ปลอดภัย เพื่อให้มีความมั่นใจว่าไม่มีสารเคมีรั่วไหลออกมาภายนอก กระบวนการผลิตภายในโรงงานสังเคราะห์พิเศษจะต้องรายงานผลให้กับผู้จัดการโรงงานสังเคราะห์พิเศษ นอกจากนั้นหัวหน้างานจะต้องฝึก/สอนทักษะการทำงานให้กับผู้ปฏิบัติงาน (Operator) ซึ่งจะต้องปฏิบัติงานตามวิธีการปฏิบัติงาน (Work Instruction)

3. ผู้จัดการโรงงานสังเคราะห์พิเศษ (SSU Plant's Manager)

ผู้จัดการโรงงานสังเคราะห์พิเศษมีหน้าที่จัดการการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตทั้งหมดให้อยู่ในการควบคุม พร้อมทั้งพัฒนากระบวนการผลิตของโรงงานสังเคราะห์พิเศษ วิธีการปฏิบัติงาน

และการวิเคราะห์ความเสี่ยง ให้มีปริมาณของผลผลิตที่ดีขึ้น ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ลดลง โดยใช้กระบวนการดำเนินงานซิกซ์ ซิกมา ซึ่งจะต้องประสานงานกับโรงงานสังเคราะห์สี (Synthesis Plant) และโรงงานสีสำเร็จรูป (Finishing Plant) อยู่เสมอ นอกจากนี้จะต้องทำการค้นหา/วิเคราะห์สาเหตุรากเหง้า และปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานภายในโรงงานสังเคราะห์พิเศษให้ถูกต้องเมื่อมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น ในบางครั้งอาจจะได้รับงาน/โปรเจกต์เพิ่มเติมจากผู้จัดการฝ่ายผลิตของกระบวนการผลิตสีย้อมผ้าฝ้าย (Production Manager of Textile Dye)

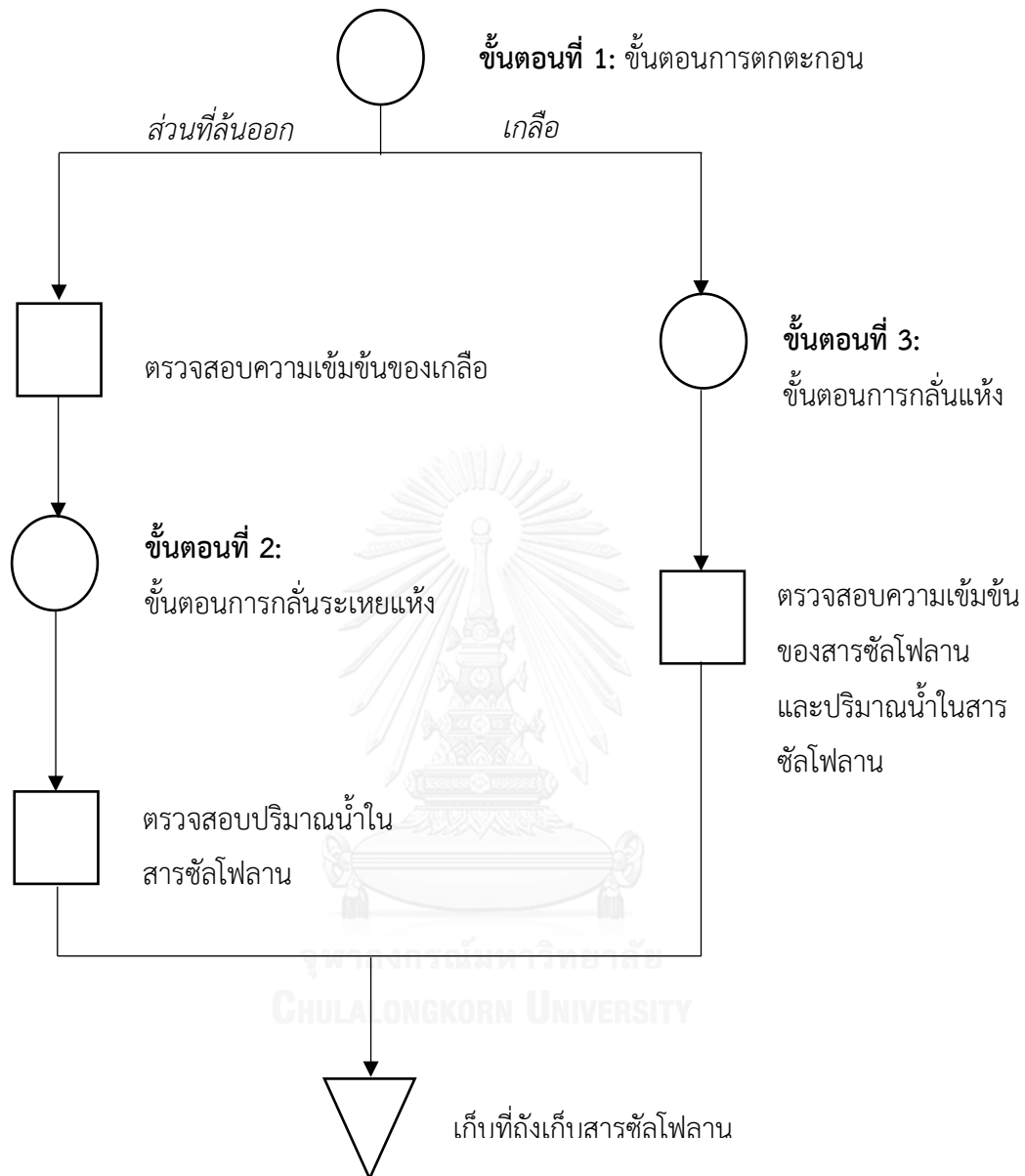
4. ผู้วิจัย

สำหรับผู้วิจัยมีหน้าที่ในการนำประชุมระดมความคิดเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ รวมทั้งวางแผนการเก็บข้อมูล วางแผนการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

การจัดตั้งทีมงานปรับปรุงในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเลือกบุคคลที่มาจากแผนกที่แตกต่างกัน เพื่อให้ความคิดที่ได้จากการระดมสมองมีความแตกต่างหลากหลาย และเป็นบุคคลที่มีความเชี่ยวชาญเหมาะสมกับงานวิจัย ซึ่งจะทำให้กระบวนการในการแก้ไขปัญหาจะสามารถทำได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น อันเนื่องมาจากบุคคลภายในทีมมีองค์ความรู้และหน้าที่ที่แตกต่างกัน

3.2 กระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน (Sulfolane Recovery Process)

กระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนที่เป็นกรณีศึกษา มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนการตกตะกอน ขั้นตอนการตรวจสอบ ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง และขั้นตอนการกลั่นแห้ง แล้วเมื่อผ่านขั้นตอนทั้งหมดแล้วจะได้สารซัลโฟลันกลับคืนมาเพื่อนำไปใช้ในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ในรอบการผลิตถัดไป ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3. 1 กระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน (Sulfolane Recovery Process)

3.2.1 ขั้นตอนที่ 1: ขั้นตอนการตกตะกอน

ขั้นตอนนี้เริ่มจากการปล่อยสาร NaCl-Sul ออกจากถังพักโดยจะปล่อยสาร 2 ครั้ง ครั้งแรกจะปล่อยสารด้วยอัตราการไหลเร็ว เพื่อให้สารเต็มถังตกตะกอน รูปที่ 3.2 อย่างรวดเร็ว แล้วรอให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในตัวทำละลายซัลโฟลาน (NaCl-Sul) ตกตะกอน จะได้ตะกอนของเกลือโซเดียมฟลูออไรด์ เกลือโซเดียมคลอไรด์อยู่ในสารซัลโฟลานที่เป็นตัวทำละลาย ซึ่งกำหนดระยะเวลา

การตกตะกอน 1 ชั่วโมง ต่อจากนั้นจะทำการปล่อยสารครั้งที่ 2 ด้วยอัตราการไหลที่ช้าจนหมดถังพัก เพื่อไม่ให้ตะกอนฟุ้งกระจาย การปล่อยสารครั้งนี้จะทำให้สารซัลโฟลันล้นออกจากถังตกตะกอน ซึ่งจะนำไปเก็บที่ถังเก็บน้ำล้น เพื่อทำการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือก่อนนำไปกลั่นที่เครื่องกลั่นระเหยแห้งในขั้นตอนที่ 2



รูปที่ 3.2 ถังตกตะกอน

3.2.2 ขั้นตอนการตรวจสอบความเข้มข้นของสาร

การตรวจสอบความเข้มข้นของสารมี 2 ส่วน คือ การตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือในสารซัลโฟลันหลังขั้นตอนที่ 1 และการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันในเกลือหลังขั้นตอนที่ 3 การตรวจสอบความเข้มข้นทั้ง 2 ส่วนในปัจจุบันนั้นใช้วิธีการกรองแบบลดความดัน (Vacuum Filtration) การตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือหลังขั้นตอนที่ 1 นั้นนำสารมาจากถังเก็บน้ำล้น รูป 3.3 มาตรวจสอบ โดยจะกรองแยกเกลือ (NaCl, NaF) กับสารซัลโฟลันออกจากกัน จากนั้นคำนวณปริมาณเกลือในหน่วยกิโลกรัมต่อสารละลายซัลโฟลัน 100 กิโลกรัม แล้วจึงพิจารณาว่าน้อยกว่าความเข้มข้นของเกลืออยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ (น้อยกว่า 1%) หากอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้ว จะส่งไปกลั่นในขั้นตอนที่ 2 ได้ แต่ถ้าหากมากกว่า 1% จะต้องนำไปรวมในถังตกตะกอนใหม่อีกครั้งหนึ่ง เพื่อทำการกลั่นในรอบการผลิตถัดไป สำหรับการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันหลังขั้นตอนที่ 3 นั้นใช้วิธีการกรองแบบลดความดันเช่นเดียวกันกับการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือ แต่แตกต่างกันที่วิธีการคำนวณ โดยจะคำนวณปริมาณสารซัลโฟลันในหน่วยกิโลกรัมต่อเกลือ 100 กิโลกรัม แล้วจึงพิจารณาความเข้มข้นของสารซัลโฟลันอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ (น้อยกว่า 3%) ทั้งนี้เพื่อให้สารซัลโฟลันในเกลือที่กลั่นมาจากเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งระเหยออกไปมากที่สุด



รูปที่ 3.3 ถังเก็บน้ำล้น

3.2.3 ขั้นตอนที่ 2: ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง

ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้งเป็นขั้นตอนต่อจากขั้นตอนการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือ ดังนั้นสารที่เข้าสู่ขั้นตอนการกลั่นนี้คือ สารที่ล้นออกมาจากถังตกตะกอนภายหลังจากปล่อยสารจาก ถังพักครั้งที่ 2 สารนั้นจะต้องมีความเข้มข้นของเกลือน้อยกว่า 1% เนื่องจากผ่านขั้นตอนการ ตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือที่ถังน้ำล้นมาแล้ว การกลั่นในขั้นตอนนี้จะกลั่นที่เครื่องกลั่นระเหย แห้ง รูปที่ 3.4 จะกลั่นโดยวิธีการลดความดันเพื่อให้จุดเดือดของสารลดลง



รูปที่ 3.4 เครื่องกลั่นระเหยแห้ง

3.2.4 ขั้นตอนที่ 3: ขั้นตอนการกลั่นแห้ง

การกลั่นที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง รูปที่ 3.5 จะกลั่นโดยวิธีการลดความดันเพื่อให้จุดเดือดของ สารลดลงเช่นเดียวกับกลั่นที่เครื่องกลั่นระเหยแห้ง แต่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งนี้จะมีใบพัดไว้ใช้ สำหรับกวนสาร เนื่องจากสารที่กลั่นในเครื่องนี้เหมาะกับสารที่มีลักษณะเป็นของหนืดซึ่งก็คือ เกลือ

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และเกลือโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) ที่ป้อนมาจากบริเวณถังตกตะกอนจาก
ขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 3.5 เครื่องกั่นแห้งแนวตั้ง

3.2.5 ขั้นตอนการตรวจสอบปริมาณน้ำในสารซัลโฟลัน (Water Content: W/C)

ภายหลังจากการกั่นสารในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 แล้วจะส่งสารมายังถังรับ รูปที่ 3.6 ซึ่งทำหน้าที่ในการรับสารและนำไปตรวจสอบปริมาณน้ำในสารซัลโฟลันที่กั่นเสร็จว่าอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ (น้อยกว่า 0.1%) เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีน้ำเจือปนเข้ามาภายในระบบ



รูปที่ 3.6 ถังรับ

3.3 สภาพปัญหาปัจจุบัน

จากการสังเกตการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการหลัก พบว่าในส่วนของการผลิตนั้นใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการนำสารกลับคืนซึ่งสารซัลโฟลันนั้น เป็นสารที่ใช้เป็นตัวทำละลายสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ จึงทำให้เกิดการรอ กระบวนการนำสารกลับคืน เมื่อนำกระบวนการดังกล่าวมาศึกษาข้อมูลโดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 คือ ขั้นตอนการตกตะกอนจะเริ่มตั้งแต่รับสาร NaCl-Sul จากถังพักมายังถังตกตะกอน จนกระทั่งสารล้นออกไป รวมถึงปั๊มเกลือไปยังเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง

ขั้นตอนที่ 2 คือ ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง จะเริ่มตั้งแต่การรับสารที่ล้นมาเก็บที่ถังเก็บน้ำล้น แล้วส่งไปกลั่นที่เครื่องกลั่นระเหยแห้งและส่งไปเก็บที่ถังเก็บสารซัลโฟลาน (Sulfolane Storage Tank)

ขั้นตอนที่ 3 คือ ขั้นตอนการกลั่นแห้ง จะทำการกลั่นที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง จนกระทั่งส่งไปเก็บที่ถังเก็บสารซัลโฟลาน

เมื่อพิจารณาเวลาของการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ใน 1 รอบการผลิตจะใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 12 ชั่วโมง โดยขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่ทำให้รอบเวลาของการผลิตยาวนานถึง 12 ชั่วโมง แต่ระยะเวลาของกระบวนการผลิตนั้นใช้ระยะเวลาเฉลี่ยเพียง 8 ชั่วโมง ดังนั้นเป้าหมายของวิจัยนี้คือ ลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนให้ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์คือ 8 ชั่วโมง โดยมุ่งปรับปรุงแก้ไขเฉพาะขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ของกระบวนการนำสารกลับคืน เพื่อไม่ให้เกิดการรอหรือเกิดการรอน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

3.4 สรุปการศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา

หลังจากที่มีการศึกษากระบวนการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์และสภาพปัญหาในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาแล้ว ได้กำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน ตั้งแต่เดือนธันวาคม ปี พ.ศ.2558 ถึงเดือนเมษายน ปี พ.ศ.2560 และกำหนดปัญหาคือ รอบเวลาในกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนยาวนาน ซึ่งต่อมาได้ทำการศึกษากระบวนการดังกล่าวในแต่ละขั้นตอน พบว่ามีเพียงขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ของกระบวนการที่ทำให้รอบเวลาของกระบวนการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ยาวนาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดขอบเขตการปรับปรุงคือ 2 ขั้นตอนดังกล่าว โดยกำหนดเป้าหมายคือ ลดระยะเวลาของทั้งสองขั้นตอนให้ใกล้เคียงกับรอบเวลาของการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ 1 รอบการผลิตคือ 8 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการรอน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หากลดรอบเวลาของทั้งสองขั้นตอนดังกล่าวได้ตามเป้าหมาย กล่าวคือ รอบเวลาของกระบวนการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ลดลงประมาณ 4 ชั่วโมง จากเดิมรอบเวลาเฉลี่ย 12 ชั่วโมง เหลือ 8 ชั่วโมง ซึ่งมีผลทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงด้วย ต้นทุนในการผลิตในที่นี่ประกอบไปด้วย ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า ปัจจุบันต้นทุนในการผลิตมีค่าประมาณ 5,040 บาท/ชั่วโมง หากลดรอบเวลาได้ตามเป้าหมายจะทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิตประมาณ 20,160 บาท/รอบการผลิต (5,040 บาท/ชั่วโมง \times 4 ชั่วโมง = 20,160 บาท/รอบการผลิต) นอกจากนี้ยังสามารถผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ได้มากกว่าเดิม จากประมาณ 2 รอบการผลิต/วัน เป็น 3 รอบการผลิต/วัน ซึ่งทำให้ผลิตสีย้อมผ้าได้เพิ่มขึ้นเพื่อรองรับกับความต้องการของลูกค้าที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามหากลดรอบเวลา

มากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อในเชิงลบกับความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลาน เช่น การลดช่วงเวลารอกการตกตะกอนทำให้รอบเวลาดลดลง แต่อาจทำให้เกลี้ยงยังตกตะกอนไม่หมดซึ่งมีผลทำให้สารซัลโฟลานไม่บริสุทธิ์เท่าที่ควร ตัวชี้วัดความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 1 คือ ความเข้มข้นของเกลือ (ต้องน้อยกว่า 1%) และตัวชี้วัดความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 คือ ความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน (ต้องน้อยกว่า 3%) ดังนั้นการปรับปรุงเพื่อลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนในเรื่องหรือปัจจัยใดๆ จะต้องพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดกับความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ด้วย ผู้วิจัยสรุปสัญญาโครงการ (Project Charter) ดังนี้



Project Charter																				
Project Title: Reduction of Cycle Time of Sulfolane Recovery Process in Cyanuric Fluoride Manufacturing in Textile Dye Industry																				
Business Case: รอบเวลาของการนำสารซัลโฟลานกลับคืนยาวนาน ส่งผลกระทบให้ต้นทุนในการผลิตสูง และปริมาณผลผลิตน้อย	Project Constraint: 1) สมาชิกในทีมมีเวลาในการทำโครงการนี้ 6 ชม./สัปดาห์ 2) เครื่องจักรที่เลือกมาทำการทดลอง จะต้องใช้ในการผลิตจริงด้วย จึงต้องวางแผนเวลาในการทดลองให้รัดกุมไม่ให้เกิดกระทบต่อการผลิต																			
Problem Statement: รอบเวลาของการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์เฉลี่ย 8 ชม. แต่รอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนเฉลี่ย 12 ชม. จึงทำให้เกิดการรอสารซัลโฟลาน เพื่อนำสารไปใช้ในกระบวนการผลิตถัดไป กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการตกตะกอน ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง และขั้นตอนการกลั่นแห้ง ขั้นตอนที่ทำให้รอบเวลายาวนานคือ ขั้นตอนการตกตะกอนและขั้นตอนการกลั่นแห้ง	Project Assumption: 1) รวบรวมข้อมูลและมีการสรุปความคืบหน้าผลการดำเนินโครงการทุก 4 สัปดาห์ 2) ได้รับการสนับสนุนในการดำเนินโครงการจากผู้บริหารระดับสูงในบริษัท 3) รายงานความคืบหน้าในการทำโครงการให้กับผู้บริหารทุกเดือน 4) สมาชิกในทีมทุกคนจะต้องเข้าประชุมทีมทุก 4 สัปดาห์ ตามวันที่ได้กำหนด																			
Objective Statement: ปรับปรุงรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนให้ลดลงจาก 12 ชั่วโมง เหลือ 8 ชั่วโมง ภายในเดือนเมษายน 2560 ซึ่งจะทำให้ผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ได้มากกว่าเดิมจาก 2 รอบการผลิต/วัน เป็น 3 รอบการผลิต/วัน	Team Members: Project Leader: Nopdanai K. (Production Manager) Project Sponsor: Apisak T. (Manager Site) Black Belt: Nuttaphon I. (Plant Manager) Green Belt: Somsak S. (Plant Supervisor)																			
Project Metrics: Business Metric: ต้นทุนในการผลิต Primary Metric: รอบเวลาการผลิต (ชั่วโมง) Secondary Metric: ปริมาณผลผลิต Consequential: Salt Content, Sulfolane Content Financial metrics: ต้นทุนในการผลิต	Project Timeline: ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการโครงการ ตั้งแต่ 1 ธันวาคม 2558 ถึง 30 เมษายน 2560																			
Project Scope: ศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน	<table border="1"> <thead> <tr> <th>กิจกรรม</th> <th>เริ่มต้น</th> <th>สิ้นสุด</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Define</td> <td>1 ธ.ค. 2558</td> <td>31 ธ.ค. 2558</td> </tr> <tr> <td>Measure</td> <td>1 ม.ค. 2559</td> <td>29 ก.พ. 2559</td> </tr> <tr> <td>Analysis</td> <td>1 พ.ย. 2559</td> <td>31 ธ.ค. 2559</td> </tr> <tr> <td>Improve</td> <td>1 ม.ค. 2559</td> <td>31 ม.ค. 2559</td> </tr> <tr> <td>Control</td> <td>1 ก.พ. 2559</td> <td>31 เม.ย. 2559</td> </tr> </tbody> </table>		กิจกรรม	เริ่มต้น	สิ้นสุด	Define	1 ธ.ค. 2558	31 ธ.ค. 2558	Measure	1 ม.ค. 2559	29 ก.พ. 2559	Analysis	1 พ.ย. 2559	31 ธ.ค. 2559	Improve	1 ม.ค. 2559	31 ม.ค. 2559	Control	1 ก.พ. 2559	31 เม.ย. 2559
กิจกรรม	เริ่มต้น	สิ้นสุด																		
Define	1 ธ.ค. 2558	31 ธ.ค. 2558																		
Measure	1 ม.ค. 2559	29 ก.พ. 2559																		
Analysis	1 พ.ย. 2559	31 ธ.ค. 2559																		
Improve	1 ม.ค. 2559	31 ม.ค. 2559																		
Control	1 ก.พ. 2559	31 เม.ย. 2559																		

บทที่ 4

การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

หลังจากการศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหาแล้ว ขั้นตอนการวิจัยต่อมาคือดำเนินการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ซึ่งเริ่มจากการระดมสมองเพื่อศึกษาวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารกลับคืน โดยใช้แผนผังสาเหตุและผล การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ และแผนภูมิพาเรโตเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เพื่อค้นหาปัจจัยสาเหตุที่มีผลกระทบต่อรอบเวลามากที่สุด

4.1 แนวทางการลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน

หลังจากผู้วิจัยได้ทำการศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน จึงมีแนวทางในการลดระยะเวลาของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ดังนี้

ในขั้นตอนที่ 1 คือ ขั้นตอนการตกตะกอน จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้คือ ต้องการให้มีเกลือตกตะกอนอยู่บริเวณก้นถังตกตะกอนมากที่สุด และสารที่ล้นออกมามีเกลือปะปนน้อยที่สุดโดยใช้เวลาน้อยที่สุด ในส่วนของการรับสารจากถังพักมีปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ คือ “อัตราการไหลของสาร NaCl-Sul” ซึ่งเป็นอัตราการไหลจากถังพักมายังถังตกตะกอนในครั้งที่ 2 จะวัดในหน่วยของกิโลกรัม/ชั่วโมง ปัจจุบันครั้งแรกของการรับสารนั้นมีการควบคุมอัตราการไหลให้เร็ว เพื่อให้สารเต็มถึงตกตะกอนอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงรอการตกตะกอนประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยสารที่เหลือจากถังพักเข้ามาเป็นครั้งที่ 2 ด้วยอัตราการไหลที่ช้า เพื่อให้สารค่อยๆ ล้นออกไป สำหรับแนวทางในการลดเวลาคือ หาค่าที่เหมาะสมของอัตราการไหลในการปล่อยสารครั้งที่ 2 เนื่องจากปัจจุบันค่าที่ใช้อยู่ไม่มีความแน่นอน ไม่สามารถมั่นใจได้ว่าเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งถ้าหากอัตราการไหลเร็วมากเกินไปจะทำให้เกลือในถังตกตะกอนฟุ้งกระจาย และทำให้สารที่ล้นออกมามีเกลือเจือปนอยู่มากเกินกว่าที่จะสามารถนำไปกลั่นในขั้นตอนที่ 2 ได้ แต่ถ้าอัตราการไหลช้าเกินไปจะทำให้ระยะเวลาของขั้นตอนการรับสารนานโดยเปล่าประโยชน์ สำหรับการปล่อยสารในครั้งที่ 1 นั้นจะไม่นำมาทำการวิจัยเนื่องจากอัตราการไหลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นเร็วมากที่สุดอยู่แล้ว (1,000 – 1,200 กิโลกรัม/ชั่วโมง) ปัจจัยต่อมาที่ต้องทำการศึกษาในขั้นตอนที่ 1 นี้คือ “ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน” ซึ่งความเร็วใบพัดนี้สามารถตั้งค่าได้ตั้งแต่ 0 – 4 รอบ/นาที (Round per Minute: rpm.) ปัจจุบันโรงงานตั้งค่าความเร็วใบพัดให้มีความเร็วเท่ากับ 0.5 รอบ/นาทีตลอดช่วงเวลาของขั้นตอนที่ 1 กล่าวคือ ตั้งแต่เริ่มปล่อยสารออกจากถังพักจนกระทั่งสารหมดถังพัก หลังจากจบสิ้นขั้นตอนที่ 1 แล้วจะเริ่มปั๊มเกลือจากบริเวณก้น

ถึงตกตะกอนไปยังเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง ในช่วงเวลานี้จะเปลี่ยนความเร็วใบพัดให้เท่ากับ 4 รอบ/นาาที เพื่อให้เกล็ดที่ติดค้างบริเวณข้างถังตกลงมา แนวทางการลดเวลาของปัจจัยนี้คือ หาค่าที่เหมาะสมของความเร็วใบพัดในช่วงเวลาของขั้นตอนที่ 1 ถ้าหากตั้งค่าความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนเร็ว จะต้องไม่ทำให้สารที่ล้นออกมานั้นมีเกล็ดเจือปนอยู่มากเกินไป และในทางตรงกันข้าม ถ้าหากตั้งค่าความเร็วใบพัดช้า จะต้องไม่ทำให้รอบเวลานานขึ้นและมีเกล็ดอุดตันบริเวณก้นถังตกตะกอน อีกปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจคือ “ช่วงเวลารอการตกตะกอน” ที่ถังตกตะกอน เกิดขึ้นหลังจากการปล่อยสาร NaCl-Sul ครั้งที่ 1 ปัจจุบันโรงงานกำหนดช่วงเวลาดังกล่าวไว้ที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งคาดการณ์ว่าเป็นระยะเวลาที่มากพอที่เกล็ดจะตกตะกอนหมดแล้ว แต่มีทางเป็นไปได้ว่าอาจจะใช้เวลาน้อยกว่าช่วงเวลาที่กำหนด จึงควรทำการศึกษาปัจจัยดังกล่าวเพื่อหาค่าที่เหมาะสมเช่นกัน

สำหรับขั้นตอน 3 คือ ขั้นตอนการกลั่นแห้ง จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้คือ ต้องการกลั่นเกล็ดที่บ่มออกมาจากก้นถังตกตะกอนให้แห้งมากที่สุดโดยใช้เวลาน้อยที่สุด ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลั่นภายในเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง คือ ความดันอากาศ (Pressure: P) อุณหภูมิ (Temperature: T) และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (Speed of Agitator) ทั้ง 3 ปัจจัยเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ปัจจัยแรกที่จะกล่าวถึงคือ “ความดันอากาศ” ซึ่งสามารถตั้งค่าความดันอากาศที่เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ได้ต่ำสุดที่ 40 mbar สาเหตุที่ต้องลดความดันอากาศคือ เพื่อให้สารซัลโฟลานมีจุดเดือดลดลงซึ่งจะทำให้ระเหยได้เร็วขึ้น ไม่เสียเวลาในการรอให้ความร้อน (Heating) กับเครื่องกลั่นและลดการใช้พลังงาน สารซัลโฟลานมีจุดเดือดปกติเท่ากับ 286 °C ซึ่งถ้าหากลดความดันอากาศเหลือ 40 mbar จะทำให้จุดเดือดของสารซัลโฟลานลดลงเหลือประมาณ 160 °C แต่ถ้าลดความดันอากาศต่ำเกินไปคือมีแรงดูดอากาศมาก จะทำให้เกล็ดฟุ้งและติดปะปนไปกับสารซัลโฟลานที่ระเหยออกไป ดังนั้นจึงต้องปรับค่าความดันอากาศให้มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และไม่ส่งผลเสียความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลาน จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าความดันอากาศนั้นมีผลสอดคล้องกับ “อุณหภูมิ” เนื่องมาจากการลดความดันอากาศจะทำให้จุดเดือดของสารซัลโฟลานลดลง ดังนั้นการปรับตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งจึงขึ้นอยู่กับลดความดันอากาศคือจะตั้งค่าให้เท่ากับจุดเดือดใหม่หลังลดความดัน แต่ในความเป็นจริงแล้วสามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องให้มากกว่าจุดเดือดสารได้ เพราะยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นเท่าไรก็ยิ่งทำให้สารซัลโฟลานระเหยเร็วขึ้นเท่านั้น แนวคิดในการปรับปรุงปัจจัยนี้คือ ปรับการตั้งค่าของอุณหภูมิโดยให้มีอุณหภูมิสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และมีความสอดคล้องกับความดันอากาศ โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวไม่ทำให้เกล็ดแห้งติดค้างอยู่ภายในเครื่องกลั่น และไม่ทำให้เสียเวลาในการให้พลังงานความร้อนกับเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งมากเกินไป นอกจากนี้ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน คือ “ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง” สามารถปรับค่าได้แต่ 0 – 20 รอบ/นาาที ปัจจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อกวาดเกล็ดที่มีสภาพเหนียวเข้ากัน พร้อมทั้งกวาดเกล็ดที่ติดบริเวณด้านข้างให้ลงมา

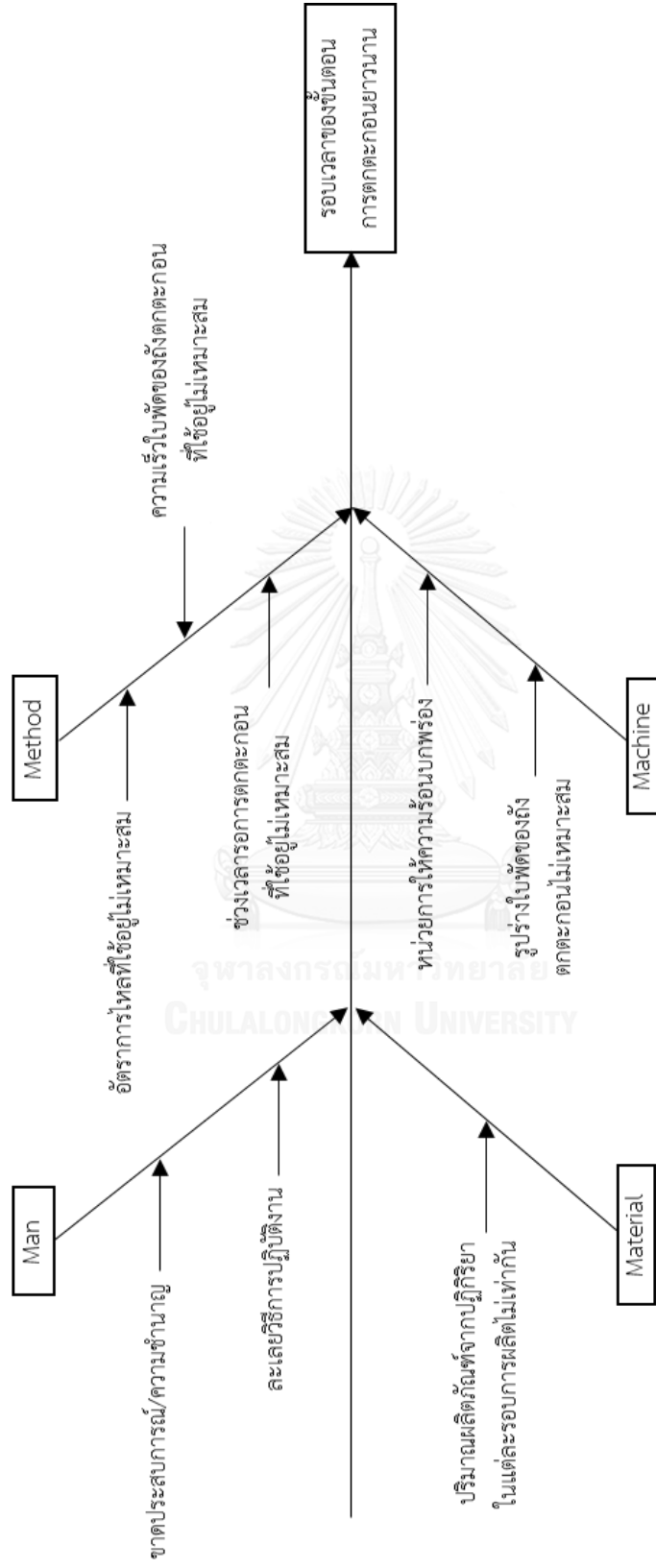
ดังนั้นในปัจจุบันโรงงานจึงตั้งค่าให้ความเร็วของใบพัดให้มากที่สุด คือ 20 รอบ/นาทีตลอดทั้งกระบวนการกลั่น สำหรับแนวทางการปรับปรุงความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห่งนี้ จะต้องหาค่าของความเร็วจุดที่เหมาะสมกับค่าของความดันอากาศและอุณหภูมิที่ถูกปรับค่าใหม่ เพื่อให้รอบเวลาของกระบวนการกลั่นน้อยที่สุดและสารซัลโฟลานที่ได้จากการกลั่นมีความบริสุทธิ์มีเกลือมาปะปนให้น้อยที่สุด

4.2 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลา

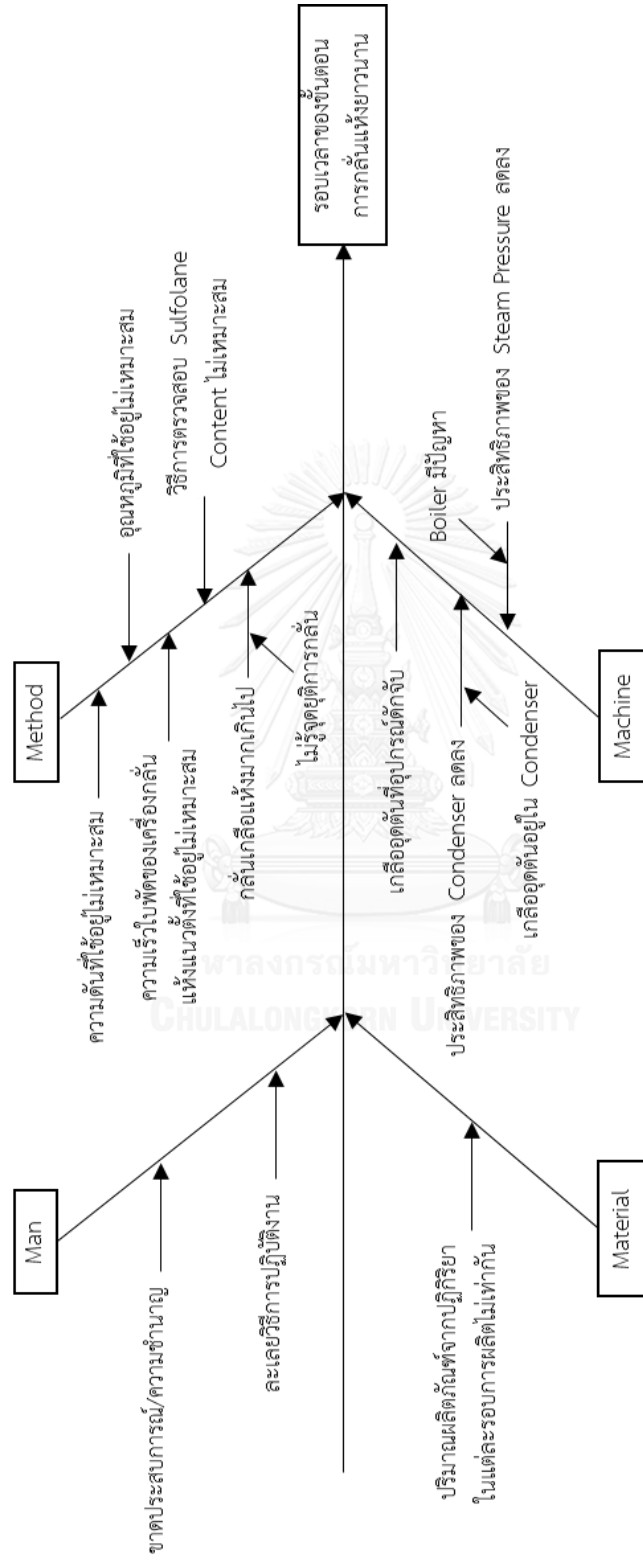
ในการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนของสมาชิกภายในทีมงานปรับปรุง ซึ่งแบ่งหมวดหมู่ของปัจจัยเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

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

ผู้วิจัยและทีมงานได้ทำการศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการตกตะกอน และขั้นตอนการกลั่นแห้ง หลังจากนั้นจึงระดมสมองเพื่อหาสาเหตุที่คาดว่าจะมีผลให้รอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนยาวนาน โดยจะพิจารณาความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานที่ผ่านกระบวนการนำสารกลับคืนไปพร้อมๆกัน โดยแสดงสาเหตุของปัญหาเป็นแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยใช้ทีมงานปรับปรุง 4 คนจากข้อ 3.1 มารดมความคิด



รูปที่ 4.1 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนการตัดตะกอน



รูปที่ 4.2 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนการกลั่นแห้ง

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งเป็นแผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอน และขั้นตอนการกลั่นแห้ง สามารถอธิบายสาเหตุของปัญหาได้ดังนี้

1. พนักงาน (Man)

ขั้นตอนการตกตะกอน/ขั้นตอนการกลั่นแห้ง : ผู้ปฏิบัติงานบางคนขาดประสบการณ์และความชำนาญในการปฏิบัติงาน รวมทั้งละเลยวิธีการปฏิบัติงาน ซึ่งจะทำให้กระบวนการทำงานผิดพลาด และขาดความต่อเนื่อง จึงทำให้รอบเวลาของกระบวนการยาวนาน ดังนั้นจึงควรจัดให้มีการอบรมให้กับผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทักษะความชำนาญและความรอบคอบในการปฏิบัติงานอยู่เสมอ

2. เครื่องจักร (Machine)

ขั้นตอนการตกตะกอน : ปัญหาเรื่องหน่วยการให้ความร้อนบกพร่องนั้นอาจจะมีสาเหตุมาจากที่เครื่องจักรมีอายุการใช้งานมานาน จึงทำให้อุณหภูมิลดลงในบางครั้ง ซึ่งอาจทำให้มีเกลือปะปนมาที่ส่วนที่ล้นออก มีผลทำให้สารซัลโฟลันที่จะนำไปกลั่นต่ออันมีความเข้มข้นของเกลือสูงเกินกว่ากำหนด (มากกว่า 1%) ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลัน สำหรับปัญหาเรื่องรูปร่างใบพัดไม่เหมาะสมนั้นเกิดจากการสังเกตการณ์ของผู้ปฏิบัติงานที่มีประสบการณ์การทำงานมานาน ซึ่งพบว่าระหว่างการคนสารในถังตกตะกอนนั้นเกลือจะติดอยู่ตามขอบและด้านข้างของถังตกตะกอนหมายความว่าใบพัดนี้ไม่สามารถคนสารได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้มีเกลือติดค้างอยู่ในถังตกตะกอนไม่สามารถป้อนไปยังเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งได้ทั้งหมด

ขั้นตอนการกลั่นแห้ง : ปัญหาเรื่องมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดังกล่าว มีผลทำให้สารที่ระเหยไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) ช้าซึ่งจะทำให้รอบเวลายาวนาน ต่อมาคือเรื่องประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลง คือไม่สามารถทำการควบแน่นสารได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากที่มีเกลืออุดตันที่เครื่องควบแน่น สำหรับเรื่องประสิทธิภาพของความดันไอน้ำ (Steam Pressure) ลดลง ซึ่งมีผลมาจากที่หม้อไอน้ำ (Boiler) มีปัญหาไม่ทำงาน ซึ่งบางครั้งเกิดจากการละเลยของผู้ปฏิบัติงานหรือเครื่องมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

3. วิธีการ (Method)

ขั้นตอนการตกตะกอน : เนื่องจากการปรับตั้งค่าของอัตราการไหล ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน และช่วงเวลารอกการตกตะกอนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่เหมาะสม มีการเพิ่ม/ลดค่าปรับตั้งอยู่ตลอดเวลา การปฏิบัติงาน จึงควรปรับปรุงค่าปรับตั้งทั้งสาม เพื่อให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้รอบเวลาดลดลง

ขั้นตอนการกลั่นแห้ง : เนื่องจากการปรับตั้งค่าของความดัน อุณหภูมิ และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่เหมาะสม มีการเพิ่ม/ลดค่าปรับตั้งอยู่ตลอดเวลาการปฏิบัติงาน จึงควรปรับปรุงค่าปรับตั้งทั้งสาม เพื่อให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้รอบเวลาดลดลง อีกทั้งวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน (Sulfolane Content) ที่ใช้อยู่ไม่น่าเชื่อถือ ซึ่งทำให้ผลการตรวจสอบความเข้มข้นไม่น่าเชื่อถือ สำหรับปัญหานี้ไม่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนแต่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานที่กลั่นได้ ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนวิธีการตรวจสอบ สำหรับการกลั่นเกลือจนแห้งมากเกินไป ซึ่งจะมีผลทำให้มีเกลือแห้งค้างติดอยู่ภายในเครื่องกลั่นแห้งและเสียเวลาในการกลั่นไปโดยเปล่าประโยชน์ มีสาเหตุมาจากที่ไม่รู้จักจุดยุติของการกลั่นแห้ง

4. วัตถุดิบ (Material)

ขั้นตอนการตกตะกอน/ขั้นตอนการกลั่นแห้ง : ปริมาณผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทางเคมีในแต่ละรอบการผลิตไม่เท่ากันตามทฤษฎีการคำนวณทางเคมี ทำให้บางรอบการผลิตมีปริมาณสารละลายไม่เท่ากัน จึงทำให้ในบางรอบการผลิตต้องใช้เวลามากกว่าหากมีปริมาณสารละลายมาก

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ได้อธิบายสาเหตุ/ปัจจัยที่เป็นไปได้ในแผนผังสาเหตุและผลของขั้นตอนการตกตะกอน และขั้นตอนการกลั่นแห้งของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน ซึ่งสาเหตุในเรื่องของพนักงานและวัตถุดิบจะไม่นำไปศึกษาต่อ เนื่องจากปัญหาในเรื่องของพนักงานนั้นได้ดำเนินการแก้ไขแล้ว โดยมีการจัดการอบรมและฝึกทักษะด้วยการสอบวัดทักษะปีละ 2 ครั้ง สำหรับปัญหาเรื่องวัตถุดิบเป็นปัญหาที่ไม่สามารถทำการควบคุมได้ อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลายานัก ดังนั้นขั้นตอนต่อมาคือ การนำสาเหตุในเรื่องของเครื่องจักรและวิธีการที่ได้จากแผนผังสาเหตุและผลมาทำการจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ/ปัจจัย โดยใช้ตัวเลขแสดงลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) ของเกณฑ์การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) พร้อมทั้งวิเคราะห์หาความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารกลับคืน (Effects of Failure Mode) สาเหตุของการเกิดลักษณะข้อบกพร่องต่างๆ (Causes of Failure Mode) และการตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่องนั้นๆในปัจจุบัน (Current Control) ต่อจากนั้นจึงนำเกณฑ์การให้คะแนนของ AIAG [12] ซึ่งเป็นเกณฑ์การให้คะแนนของอุตสาหกรรมยานยนต์มาปรับประยุกต์ โดยจะปรับให้เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมทางด้านเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงให้บุคคลในทีมมาลงคะแนน ซึ่งคะแนนในที่นี้คือ ความรุนแรง (Severity: S) ความถี่ในการเกิด (Occurrence: O) และความสามารถในการตรวจจับ (Detection: D)

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของข้อบกพร่อง

ผลกระทบ	ระดับความรุนแรงของลักษณะข้อบกพร่อง	คะแนน
มากที่สุด	มีผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซิลโฟลานมากที่สุด ไม่สามารถดำเนินการผลิตต่อไปได้ จนต้องหยุดการดำเนินการผลิต เนื่องจากทำให้เครื่องจักรบกพร่อง เช่น มีสารรั่วออกมาจากเครื่องจักร	10
มาก	มีผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซิลโฟลานมาก ควรริบทำการปรับปรุงใหม่โดยการทำการทดลอง เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมใหม่ หรือหยุดการผลิตมากกว่า 30 นาที เนื่องจากเครื่องจักรบกพร่อง เช่น อัตราการไหลเร็วทำให้เกลือฟุ้งติดไปกับส่วนที่ล้นออก ซึ่งส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของสารซิลโฟลานโดยตรง ควรริบหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสม	9
ค่อนข้างมาก	มีผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซิลโฟลานค่อนข้างมาก ควรต้องทำการปรับปรุงใหม่โดยการทำการทดลอง เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมใหม่ หรือหยุดการผลิต 5 – 10 นาที เนื่องจากเครื่องจักรบกพร่อง เช่น หน่วยการให้ความร้อนบกพร่อง	8
ปานกลางค่อนข้างมาก	มีผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซิลโฟลานปานกลางค่อนข้างมาก ควรทำการปรับปรุงใหม่โดยการทำการทดลอง เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมใหม่ โดยไม่ต้องหยุดการผลิต เช่น มีเกลือฟุ้งติดไปกับส่วนที่ระเหยออก ส่งผลให้มีเกลืออุดตันที่เครื่องจักร	7
ปานกลาง	มีผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซิลโฟลานปานกลาง สามารถทำการปรับปรุงได้ โดยไม่ต้องทำการทดลอง แต่ใช้ระยะเวลานานในการปรับปรุงแก้ไข	6
ปานกลางค่อนข้างน้อย	มีผลกระทบต่อรอบเวลาปานกลางค่อนข้างน้อย สามารถทำการปรับปรุงได้ โดยไม่ต้องทำการทดลอง แต่ใช้ระยะเวลานานในการปรับปรุงแก้ไข	5
ค่อนข้างน้อย	มีผลกระทบต่อรอบเวลาปานกลางค่อนข้างน้อย สามารถทำการปรับปรุงได้ โดยไม่ต้องทำการทดลอง ซึ่งใช้ระยะเวลาไม่นานในการแก้ไข	4

ผลกระทบ	ระดับความรุนแรงของลักษณะข้อบกพร่อง	คะแนน
น้อย	มีผลกระทบต่อรอบเวลาน้อย สามารถทำการปรับปรุงได้ การปรับปรุงแก้ไข โดยไม่ต้องทำการทดลอง ซึ่งสามารถสามารถดำเนินการแก้ไขได้โดยทันที	3
น้อยมาก	มีผลกระทบต่อรอบเวลาน้อยมาก สามารถยอมรับได้ โดยจะทำการปรับปรุงแก้ไขหรือไม่ก็ได้	2
น้อยที่สุด	มีผลกระทบต่อรอบเวลาน้อยที่สุด สามารถยอมรับได้ โดยไม่ต้องทำการปรับปรุงแก้ไข	1

ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การประเมินผลโอกาสการเกิดขึ้นของข้อบกพร่อง

ผลกระทบ	ความถี่ในการเกิดขึ้นของสาเหตุข้อบกพร่อง ของแต่ละรอบการผลิต	คะแนน
มากที่สุด	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่า 90% เช่น วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันนั้นต้องตรวจ ทุกรอบการผลิต	10
มาก	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 80 - 89% เช่น การกำหนดค่าปรับตั้งต่างๆ ที่ต้องคอยควบคุมบ่อยครั้ง	9
ค่อนข้างมาก	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 70 - 79% เช่น การกำหนดค่าปรับตั้งต่างๆ ที่ต้องคอยควบคุมในบางครั้ง	8
ปานกลางค่อนข้าง ไปทางมาก	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 60 - 69% เช่น การกำหนดค่าปรับตั้งที่ตั้งค่าเพียงครั้งเดียวต่อรอบการผลิต	7
ปานกลาง	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 50 - 59%	6
ปานกลางค่อนข้าง ไปทางน้อย	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 40 - 49% เช่น การทำความสะอาดอุปกรณ์/เครื่องจักรในบางครั้ง	5
ค่อนข้างน้อย	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 30 - 39%	4
น้อย	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 20 - 29% เช่น เกิดจุดตันอยู่ภายในเครื่องควบแน่น	3
น้อยมาก	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้น 10 - 19% เช่น หน่วยการให้ความร้อนบภพ่อง ซึ่งนานๆครั้งจะเกิดขึ้น	2
น้อยที่สุด	ลักษณะข้อบกพร่องมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยกว่า 10%	1

ตารางที่ 4.3 เกณฑ์การประเมินผลการตรวจจับของระบบควบคุม

ผลกระทบ	ความสามารถในการตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง	คะแนน
มากที่สุด	ไม่สามารถทำการตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่องได้	10
มาก	ไม่สามารถทำการตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่องได้อย่างชัดเจน เนื่องจากไม่มีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ และไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา แต่สามารถตรวจสอบได้จากค่าวัด/คำนวณอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ความฟุ้งของเกลือในถังตกตะกอน ใช้การชั่งน้ำหนักสารเทียบกับเวลา	9
ค่อนข้างมาก	มีความเป็นไปได้ต่ำมากที่จะสามารถตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เนื่องจากไม่มีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ และไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา แต่สามารถใช้ค่าวัด/คำนวณอื่นและอาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน เช่น ความฟุ้งของเกลือในถังตกตะกอน เนื่องจากช่วงเวลารอคอยการตกตะกอนน้อยเกินไปสามารถใช้ประสบการณ์ในการคาดเดาช่วงเวลาการรอการตกตะกอนที่เหมาะสมได้	8
ปานกลางค่อนข้างไปทางมาก	มีความเป็นไปได้ต่ำที่จะสามารถตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เนื่องจากไม่มีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ แต่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา และอาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน เช่น เวลายุติการกลั่นเกลือ สามารถตรวจสอบได้ที่ช่องตรวจใส (Sight Glass) ว่าสารที่กลั่นได้มีการระเหยที่ลดลงหรือไม่	7
ปานกลาง	มีความเป็นไปได้ปานกลางค่อนข้างไปทางต่ำที่จะสามารถตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เนื่องจากไม่มีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ แต่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตาอย่างชัดเจน และอาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน เช่น มีเกลือค้างอยู่บริเวณตามขอบของถังตกตะกอน	6
ปานกลางค่อนข้างไปทางน้อย	มีความเป็นไปได้ปานกลางที่จะสามารถตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เนื่องจากมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ แต่ค่าที่วัดได้จากการใช้เครื่องมือไม่สามารถบ่งบอกการเกิดลักษณะข้อบกพร่องได้อย่างชัดเจน เช่น อัตราการกลั่นที่ลดลง ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่ามีเกลืออุดตันที่เครื่องควบแน่น เนื่องจากอาจจะเกิดมาจากสาเหตุอื่น	5

ผลกระทบ	ความสามารถในการตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง	คะแนน
ค่อนข้างน้อย	มีความเป็นไปได้ปานกลางก่อนไปทางสูงที่จะสามารถตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เนื่องจากมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ แต่เครื่องมือเกิดความบกพร่องบ่อยครั้ง เช่น ตัวส่งสัญญาณความดัน (Pressure Transmitter)	4
น้อย	มีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบมีความน่าเชื่อถือ แต่เครื่องมือเกิดความบกพร่องไปบางครั้ง	3
น้อยมาก	มีความเป็นไปได้สูงมากที่จะสามารถตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบมีความน่าเชื่อถือ และตรวจสอบได้อย่างแม่นยำ เช่น เกจวัดความดัน (Temperature Gauge)	2
น้อยที่สุด	ทำการตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่องด้วยเครื่องมือตลอดเวลา และให้สัญญาณเตือนเมื่อมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น	1

Sellappan และ Palanikumar [20] ได้เสนอว่า ในกรณีทีบุคคลในทีม FMEA มีความคิดเห็นที่แตกต่างกันในการให้คะแนนค่า S, O และ D ควรใช้ค่าเฉลี่ย RPN (Risk Priority Number) เป็นตัวเลขแสดงความเสี่ยง ซึ่งได้มาจากผลคูณที่เป็นไปได้ทั้งหมดค่า S, O และ D ขั้นตอนต่อมาคือ การคัดเลือกเรื่องที่จะนำมาปรับปรุงแก้ไข โดยปกติแล้วจะเลือกเรื่องที่มีค่า RPN สูงมาปรับปรุงก่อน แต่ถ้าหากเป็นเรื่องที่มีผลกระทบรุนแรงต่อความปลอดภัยของชีวิต หรือเกี่ยวข้องกับกฎหมาย จะนำเรื่องดังกล่าวมาปรับปรุงก่อน [21] แล้วจึงเลือกตามค่า RPN ที่มีค่าสูงตามมา

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis) ของขั้นตอนที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 3 ของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน แล้วจึงทำการให้คะแนน โดยใช้เกณฑ์การให้คะแนนในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ก่อนการให้คะแนนนั้น ได้มีการประชุมภายในทีมงานปรับปรุง เพื่อทำความเข้าใจกับเกณฑ์การให้คะแนนและตารางการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ มีผลของการให้คะแนนเป็นไปตามตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 ตามลำดับ หลังจากการให้คะแนนได้มีการประชุมอีกครั้งหนึ่ง เพื่อทำการปรึกษาหารือร่วมกันในบางลักษณะข้อบกพร่องที่มีการให้คะแนนที่แตกต่างกันเกินไป โดยจะแสดงความคิดเห็นร่วมกันถึงเหตุผลที่ให้คะแนนนั้นๆ ทั้งนี้เพื่อให้ทีมงานมีความเข้าใจที่ตรงกันและให้คะแนนในเรื่องนั้นใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนที่ 1

Process Function	Failure Mode	Effects of Failure Mode	Severity		Causes of Failure Mode		Occurrence		Current Control	Detection		RPN Average	Rank
			NTP	NDN	SS	SS	NTP	NDN		SS	NTP		
ขั้นตอนการตัดตะกอน	อัตราการไหลที่อยู่นอกเหนือที่เหมาะสม	เร็ว: เกือบพุ่งติดไปส่วนที่สั้นออก	9	9	ไม่มีการกำหนด	8	8	8	จับเวลา	8	9	576, 648	2
		ช้า: รอบเวลานาน			อัตราการไหลที่เหมาะสม								
	ความเร็วไหลของถังตกตะกอนที่อยู่นอกเหนือที่เหมาะสม	มีเกลือปะปนในส่วนที่สั้นออก	7	8	หน่วยการให้ความร้อนบกพร่อง	2	2	2	Temperature Gauge	2	2	28, 32	5
		เร็ว: เกือบพุ่งติดไปส่วนที่สั้นออก	8	9	ไม่มีการกำหนดความเร็วใบพัดที่เหมาะสม	9	9	9	หน้าจอบวม	3	4	216, 288, 243, 324	3
ช่วงเวลารอการตกตะกอนที่อยู่นอกเหนือที่เหมาะสม	น้อย: เกือบยังไม่ตกตะกอน	9	9	ไม่มีการกำหนดช่วงเวลาการตกตะกอนที่เหมาะสม	10	10	10	จับเวลา	8	8	630, 720	1	
	มาก: รอบเวลานาน												
รูปร่างของใบพัดไม่เหมาะสม	ไม่สามารถลดสารได้อย่างทั่วถึง	5	5	ปฏิบัติตาม Engineering Design	3	3	3	ตรวจสอบได้ยาก ต้องใช้สายตาในการตรวจสอบค่าตก	6	6	72, 90	4	

- หมายเหตุ: 1. นายณัฐพล อิงอรวิจิตร (NTP)
 2. นายณพนธ์ ขจรไพศาล (NDN)
 3. นายสมศักดิ์ สุวรรณภาพ (SS)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนที่ 3

Process Function	Failure Mode	Effects of Failure Mode	Severity		Causes of Failure Mode	Occurrence		Current Control	Detection		RPN Average	Rank			
			NTP	NDN		SS	NTP		NDN	SS					
ขั้นตอนการกลั่นแห้ง	ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม	เร็ว: เกล็ดฟุ้งติดไปกับส่วนที่ระเหยช้า: รอบเวลานาน	8	8	9	ไม่มีกำลังหมุนความเร็วใบพัดที่เหมาะสม	8	8	หน้าจอบควบคุม	3	4	4	192, 256, 216, 288	238	4
	ความดันอากาศที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม	ลดมากไป: เกล็ดฟุ้งติดไปกับส่วนที่ระเหยลดน้อยไป: รอบเวลานาน	8	7	8	ไม่มีกำลังหมุนความดันอากาศที่เหมาะสม	8	8	Pressure Transmitter	4	4	4	224, 252, 256, 288	255	2
	อุณหภูมิที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม	สูง: เกล็ดแห้งค้างในเครื่องต่ำ: รอบเวลานาน	8	7	8	ไม่มีกำลังหมุนอุณหภูมิที่เหมาะสม	8	8	Temperature Transmitter	4	4	4	224, 256, 240	240	3
	กลิ่นจนกลิ่นแห้งมากไป	รอบเวลานาน	5	5	4	ไม่มีเวลาหยุดกลิ่นที่เหมาะสม	3	4	ตรวจสอบได้ยาก ต้องใช้สายตาในการตรวจสอบค่าตก	7	7	7	84, 112, 105, 140	110.25	7
ขั้นตอนการกลั่นแห้ง	ประสิทธิภาพของ Steam Pressure ลดลง	รอบเวลานาน	8	9	8	Boiler มีปัญหาไม่ทำงาน	1	1	Pressure Transmitter, หน้าจอบควบคุม	2	2	2	16, 18	17	8
	ประสิทธิภาพของ Condenser ลดลง	รอบเวลานาน	8	8	8	เกล็ดอุดตันอยู่ภายใน Condenser	3	4	อัตราการกลั่น	5	5	5	120, 160	140	6
	มีเกล็ดอุดตันที่อุปกรณ์กลั่น (Demister)	สารระเหยไปไม่ถึง Condenser ชักทำให้รอบเวลานาน	8	8	7	ไม่ทำความสะอาดอุปกรณ์กลั่น	4	5	อัตราการกลั่น	5	5	5	140, 175, 160, 200	168.75	5
	วิธีการตรวจสอบ Sulfolane Content ไม่น่าเชื่อถือ	ผลการทดสอบไม่น่าเชื่อถือ	9	8	9	ไม่ทราบวิธีการตรวจสอบที่เชื่อถือ	10	10	Reduced Pressure Filtration	7	8	7	560, 640, 630, 720	637.5	1

หมายเหตุ: 1. นายณัฐพล อิงอรวิจิตรวิภา ผู้จัดการโรงงาน (NTP)
 2. นายเนพนันชัย ขจรไพศาล ผู้จัดการฝ่ายผลิต (NDN)
 3. นายสมศักดิ์ สุวรรณภานุ หัวหน้างาน (SS)

จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า การให้คะแนน S, O และ D ของทีมงานทั้ง 3 คนในแต่ละลักษณะข้อบกพร่อง (Failure Mode) มีความแตกต่างกัน โดยแตกต่างกันมากที่สุดเพียง 1 คะแนนเท่านั้น เนื่องจากได้มีการประชุมเพื่อทำความเข้าใจในการให้คะแนนทั้งก่อนและหลังการให้คะแนน แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถตกลงให้คะแนนเท่ากันได้ ดังนั้นการอธิบายรายละเอียดในการให้คะแนน S, O และ D ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยในการอธิบาย เช่น ทีมงานคนที่ 1 ให้คะแนนความรุนแรงเท่ากับ 9 ทีมงานคนที่ 2 ให้คะแนนความรุนแรงเท่ากับ 9 และทีมงานคนที่ 3 ให้คะแนนความรุนแรงเท่ากับ 8 ดังนั้นคะแนนความรุนแรงเฉลี่ยในลักษณะข้อบกพร่องนี้จึงเท่ากับ 8.7 ซึ่งหมายความว่า ความรุนแรงในลักษณะข้อบกพร่องส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนค่อนข้างมากถึงมาก

ตารางการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนที่ 1 มีรายละเอียดการให้คะแนน S, O และ D ของทีมงานทั้ง 3 คน ในแต่ละลักษณะข้อบกพร่อง ดังนี้

ลักษณะข้อบกพร่อง : อัตราการไหลที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม

ความรุนแรง (S) : การตั้งค่าอัตราการไหลเร็ว/ช้าเกินไปจะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานเป็นอย่างมาก เนื่องจากการปล่อยสารใช้เวลายาวนานมากที่สุดขั้นตอนที่ 1 ดังนั้นคะแนนความรุนแรงเท่ากับ 9 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากอัตราการไหลที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : เนื่องจากอัตราการไหลเป็นค่าที่ต้องควบคุมในแต่ละรอบการผลิต ซึ่งต้องทำการควบคุมเกือบตลอดเวลา ดังนั้นคะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 8 ซึ่งหมายความว่า อัตราการไหลที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสมมีโอกาสเกิดขึ้น 70 – 79% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การควบคุมอัตราการไหลจะทำการตรวจสอบด้วยการจับเวลาเทียบกับน้ำหนักของสารในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่จะควบคุมอัตราการไหลได้ แต่ทีมงานไม่มั่นใจว่าเมื่อปล่อยสารมายังถังตกตะกอนแล้วเกลือที่อยู่ภายในถังจะฟุ้งกระจายมากแค่ไหน เพราะไม่สามารถทำการตรวจสอบความฟุ้งนั้นได้เลย จึงให้คะแนนการตรวจสอบเฉลี่ยเท่ากับ 8.3 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ต่ำมากจนถึงไม่สามารถทำการตรวจสอบ/ควบคุมอัตราการไหลและความฟุ้งของเกลือภายในถังตกตะกอนได้อย่างชัดเจน

ลักษณะข้อบกพร่อง : มีเกลือปะปนในส่วนที่ล้นออกมา

ความรุนแรง (S) : ส่งผลกระทบต่อสารซัลโฟลานที่ล้นออกจากถังตกตะกอนมีความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้น ความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานที่จะนำไปกลั่นต่อจึงลดลง จึงให้คะแนนความรุนแรงเฉลี่ย

เท่ากับ 7.3 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากมีเกลือปะปนในส่วนที่ล้นออกมามากจะส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานปานกลางค่อนข้างมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : โอกาสที่หน่วยการให้ความร้อนบกพร่องนั้นมีน้อยมาก ซึ่งถ้าหากเกิดขึ้นจะทำให้สารที่อยู่ในถังตกตะกอนหนัก จึงทำให้สารในส่วนที่ล้นออกมีเกลือปะปนไปมาก ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 2 ซึ่งหมายความว่า การมีเกลือปะปนในส่วนที่ล้นออกมามากมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้น 10 – 19% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การควบคุมในปัจจุบันใช้เกจวัดอุณหภูมิ (Temperature Gauge) ในการตรวจสอบอุณหภูมิ ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบได้ง่ายและเครื่องมือมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 2 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้สูงมากในการตรวจสอบ/ควบคุมการมีเกลือปะปนในส่วนที่ล้นออกมา

ลักษณะข้อบกพร่อง : ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนที่ใช้ยังไม่เหมาะสม

ความรุนแรง (S) : การตั้งค่าความเร็วใบพัดเร็วเกินไปจะทำให้เกลือฟุ้งติดไปกับส่วนที่ล้นออก แต่ถ้าช้าเกินไปอาจทำให้สารหนักและเกลือไม่ตกตะกอน ส่งผลให้สารที่ล้นออกมามีเกลือปะปน ซึ่งทั้งสองกรณีจะส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของเกลือในสารที่ล้นออก หรือความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานที่จะนำไปกลั่นต่อ ดังนั้นคะแนนความรุนแรงเฉลี่ยเท่ากับ 8.7 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนที่ใช้ยังไม่เหมาะสม จะส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานค่อนข้างมากถึงมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : เนื่องจากความเร็วใบพัดเป็นค่าที่ต้องควบคุมในแต่ละรอบการผลิต ซึ่งจะต้องกวนสารตลอดเวลาของขั้นตอน ดังนั้นคะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 9 ซึ่งหมายความว่า ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนที่ใช้ยังไม่เหมาะสมมีโอกาสเกิดขึ้น 80 – 89% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การควบคุมในปัจจุบันจะตั้งค่าความเร็วใบพัดที่หน้าจอบริการ ซึ่งสามารถทำการควบคุมได้ง่ายและสามารถตั้งค่าได้อย่างแม่นยำจนถึงเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง ดังนั้นเครื่องมือในการตรวจสอบจึงมีความน่าเชื่อถือ จึงให้คะแนนการตรวจสอบเฉลี่ยเท่ากับ 3.7 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้สูงถึงปานกลางค่อนข้างสูงในการตรวจสอบ/ควบคุมความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน

ลักษณะข้อบกพร่อง : ช่วงเวลารอกการตกตะกอนที่ใช้ยังไม่เหมาะสม

ความรุนแรง (S) : ปัจจุบันรอกการตกตะกอน 1 ชั่วโมง ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเกลืออาจจะตกตะกอนไปก่อนหน้านั้นแล้ว จึงทำให้เสียเวลาไปโดยเปล่าประโยชน์ แต่ถ้าหากไม่รอกการตกตะกอนเลยก็อาจจะทำให้เกลือยังไม่ทันตกตะกอน ซึ่งจะทำให้เกลือฟุ้งกระจายติดไปกับส่วนที่ล้นออก ดังนั้นจึงให้คะแนนความรุนแรงเท่ากับ 9 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากช่วงเวลารอกการตกตะกอนที่ใช้ยังไม่เหมาะสม จะ

ส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน และความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : การรอการตกตะกอนเกิดขึ้นทุกรอบการผลิต ซึ่งใช้เวลามากถึง 1 ชั่วโมง ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 10 ซึ่งหมายความว่า ช่วงเวลารอการตกตะกอนที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสมมีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่า 90% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การรอการตกตะกอนนั้นใช้วิธีการควบคุมโดยการจับเวลาเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าเกลือในถังตกตะกอนนั้นตกตะกอนแล้วหรือยัง ดังนั้นจึงให้คะแนนการตรวจสอบเฉลี่ยเท่ากับ 7.7 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ต่ำถึงต่ำมากในการตรวจสอบการตกตะกอนและความฟุ้งของเกลือในถังตกตะกอน

ลักษณะข้อบกพร่อง : รูปร่างของใบพัดไม่เหมาะสม

ความรุนแรง (S) : เมื่อส่องดูภายในถังจากช่องตรวจใส (Sight Glass) พบว่าระหว่งการคนสาร เกลือจะถูกกวาดอยู่ตามข้างถัง จึงทำให้ไม่สามารถคนสารได้อย่างทั่วถึง ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างของใบพัดไม่เหมาะสมกับการคนสารในถังตกตะกอน จึงให้คะแนนความรุนแรงเฉลี่ย 4.7 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากรูปร่างของใบพัดไม่เหมาะสม จะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน และความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันค่อนข้างน้อยถึงปานกลางค่อนข้างน้อย

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : สาเหตุที่รูปร่างใบพัดไม่เหมาะสม เนื่องจากการออกแบบทางวิศวกรรมในตอนแรกนั้นผิดพลาด แต่ยังมีเกลือจำนวนมากที่สามารถป้อนไปกลั่นต่อได้ ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดเกลือที่ค้างอยู่ข้างถังเท่ากับ 3 ซึ่งหมายความว่า การเกิดเกลือที่ค้างอยู่ข้างถังมีโอกาสเกิดขึ้น 20 - 29% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การตรวจสอบว่าเกลือค้างอยู่ข้างถังหรือไม่ จะทำการตรวจสอบคาดเดาด้วยสายตาเท่านั้น ไม่สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 6 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ปานกลางค่อนข้างต่ำในการตรวจสอบว่ามีเกลือค้างอยู่ข้างถังตกตะกอนหรือไม่

จากตารางที่ 4.5 ตารางการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนที่ 3 มีรายละเอียดการให้คะแนน S, O และ D ของทีมงานทั้ง 3 คน ในแต่ละลักษณะข้อบกพร่อง ดังนี้

ลักษณะข้อบกพร่อง : ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งที่ใช้ยังไม่เหมาะสม

ความรุนแรง (S) : การตั้งค่าความเร็วใบพัดเร็วเกินไปจะทำให้เกลือฟุ้งติดไปกับส่วนที่ระเหย ซึ่งส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันที่กลั่นได้และทำให้เกลืออุดตันที่เครื่องควบแน่น แต่ถ้าตั้งค่าความเร็วใบพัดช้าเกินไปอาจจะทำให้สารหนืด กลั่นสารได้ช้า จึงทำให้รอบเวลานาน ดังนั้นคะแนนความรุนแรงเฉลี่ยเท่ากับ 8.3 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งที่ใช้ยังไม่

เหมาะสม จะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน และความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันค่อนข้างมากถึงมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : เนื่องจากความเร็วใบพัดเป็นค่าที่ต้องควบคุมในแต่ละรอบการผลิต ซึ่งจะต้องควบคุมตลอดเวลาของขั้นตอน ดังนั้นคะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 8 ซึ่งหมายความว่าความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสมมีโอกาสเกิดขึ้น 70 - 79% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การควบคุมในปัจจุบันจะตั้งค่าความเร็วใบพัดที่หน้าจอบริการ ซึ่งสามารถทำการควบคุมได้ง่ายและสามารถตั้งค่าได้อย่างแม่นยำจนถึงเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง ดังนั้นเครื่องมือในการตรวจสอบจึงมีความน่าเชื่อถือ จึงให้คะแนนการตรวจสอบเฉลี่ยเท่ากับ 3.7 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้สูงถึงปานกลางค่อนข้างสูงในการตรวจสอบ/ควบคุมความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง

ลักษณะข้อบกพร่อง : ความดันอากาศที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม

ความรุนแรง (S) : หากลดความดันอากาศมากเกินไปจะทำให้เกล็ดฟุ้งติดไปกับส่วนที่ระเหย ซึ่งส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันที่กลั่นได้และทำให้เกล็ดอุดตันที่เครื่องควบแน่น แต่ถ้าลดน้อยเกินไปจะสารซัลโฟลันระเหยได้ช้าลง ทำให้รอบเวลายาวนานขึ้น ดังนั้นจึงให้คะแนนความรุนแรงเฉลี่ยเท่ากับ 7.7 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากความดันอากาศที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม จะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน และความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันปานกลางค่อนข้างมากถึงค่อนข้างมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : เนื่องจากความดันอากาศเป็นค่าที่ต้องควบคุมในแต่ละรอบการผลิต ซึ่งจะต้องควบคุมตลอดเวลาของขั้นตอน ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 8.3 ซึ่งหมายความว่า ความดันอากาศที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสมมีโอกาสเกิดขึ้น 70 - 89% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การควบคุมในปัจจุบันจะใช้ตัวส่งสัญญาณแรงดัน (Pressure Transmitter) เป็นเครื่องมือที่น่าเชื่อถือ แต่บางครั้งยังมีความผิดพลาด จึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 4 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ปานกลางค่อนข้างสูงในการตรวจสอบ/ควบคุมความดันอากาศของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง

ลักษณะข้อบกพร่อง : อุณหภูมิที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม

ความรุนแรง (S) : หากเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมากเกินไปจะทำให้เกล็ดแห้งค้างอยู่ในเครื่อง ทำให้เครื่องกลั่นทำงานบกพร่อง แต่ถ้าหากลดน้อยเกินไปสารจะระเหยช้าลง ทำให้รอบเวลายาวนาน ดังนั้นคะแนนความรุนแรงเฉลี่ยเท่ากับ 7.7 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากอุณหภูมิที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม จะส่งผล

กระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนปานกลางค่อนข้างมากถึงค่อนข้างมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : เนื่องจากอุณหภูมิเป็นค่าที่ต้องควบคุมในแต่ละรอบการผลิต ซึ่งจะต้องควบคุมตลอดเวลาของขั้นตอน ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 8 ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสมมีโอกาสเกิดขึ้น 70 - 79% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การควบคุมในปัจจุบันจะใช้ตัวส่งสัญญาณอุณหภูมิ (Temperature Transmitter) เป็นเครื่องมือที่น่าเชื่อถือ แต่บางครั้งยังมีความผิดพลาด จึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 4 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ปานกลางค่อนข้างสูงในการตรวจสอบ/ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง

ลักษณะข้อบกพร่อง : กลั่นเกลือแห้งมากเกินไป

ความรุนแรง (S) : การกลั่นเกลือแห้งมากเกินไป จะทำให้รอบเวลานานขึ้นโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งนี้ถ้าหากผู้ปฏิบัติงานมีความเชี่ยวชาญ สังเกตว่าไม่มีสารระเหยแล้ว และหยุดการกลั่น จะไม่ทำให้เสียเวลา ดังนั้นจึงให้คะแนนความรุนแรงเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากกลั่นเกลือแห้งมากเกินไป จะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนค่อนข้างน้อยถึงปานกลางค่อนข้างน้อย

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : สาเหตุที่กลั่นเกลือแห้งมากเกินไป เพราะไม่รู้เวลาในการหยุดกลั่นที่เหมาะสม ซึ่งในแต่ละรอบการผลิตไม่เกิดบ่อยครั้งนัก จึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.3 ซึ่งหมายความว่า การกลั่นเกลือแห้งมากเกินไปมีโอกาสเกิดขึ้น 20 - 39% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การตรวจสอบว่าควรยุติการกลั่นหรือยัง จะทำการตรวจสอบด้วยสายตาที่ช่องตรวจใส (Sight Glass) ว่ามีสารที่กลั่นเสร็จแล้วระเหยมาจำนวนน้อยลงหรือไม่ ถ้าไม่ค่อยมีสารที่ระเหยแล้วจะหยุดการกลั่น เนื่องจากเป็นการตรวจสอบด้วยสายตาโดยใช้สายตาในการคาดเดา จึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 7 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ต่ำในการตรวจสอบ/ควบคุมการกลั่นเกลือแห้งมากเกินไป

ลักษณะข้อบกพร่อง : ประสิทธิภาพของความดันไอน้ำ (Steam Pressure) ลดลง

ความรุนแรง (S) : ความดันไอน้ำที่กล่าวถึงนี้จะอยู่รอบๆเครื่องกลั่นแห้ง ซึ่งใช้เป็นตัวให้ความร้อน (Heating) กับเครื่องกลั่นแห้ง ถ้าหากประสิทธิภาพของความดันไอน้ำลดลงกล่าวคือความดันไอน้ำเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้อุณหภูมิที่ให้กับเครื่องกลั่นแห้งลดลง ดังนั้นจึงกลั่นสารได้ช้าลง จึงทำให้รอบเวลายาวนาน คะแนนความรุนแรงเฉลี่ยจึงเท่ากับ 8.7 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากประสิทธิภาพของ

ความดันไอน้ำลดลง จะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนค่อนข้างมากถึงมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของความดันไอน้ำลดลง เกิดจากการที่หม้อไอน้ำ (Boiler) ไม่ทำงานหรือทำงานบกพร่อง เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนานแล้ว ซึ่งแทบจะไม่มีโอกาสในการเกิดขึ้น จึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่า ประสิทธิภาพของความดันไอน้ำลดลงมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยกว่า 10% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การตรวจสอบว่าประสิทธิภาพของความดันไอน้ำลดลงหรือไม่ จะทำการตรวจสอบโดยใช้ตัวส่งสัญญาณความดัน (Pressure Transmitter) และสามารถตรวจสอบได้ที่หน้าจอบควบคุม จึงทำการตรวจสอบได้ง่ายและมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 2 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้สูงมากในการตรวจสอบ/ควบคุมประสิทธิภาพของความดันไอน้ำ

ลักษณะข้อบกพร่อง : ประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่น (Condenser) ลดลง

ความรุนแรง (S) : ถ้าหากประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลง จะทำให้ความสามารถในการควบแน่นของสารลดลง ซึ่งส่งผลให้รอบเวลานานขึ้น ดังนั้นจึงให้คะแนนความรุนแรงเท่ากับ 8 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลง จะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืนค่อนข้างมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลง เนื่องจากมีเกลืออุดตันอยู่ในเครื่องควบแน่น ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสการเกิดขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.7 ซึ่งหมายความว่า ประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลงมีโอกาสเกิดขึ้น 20 - 39% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การตรวจสอบว่าประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลงหรือไม่ เราจะทำการตรวจจากอัตราการกลั่น ทั้งนี้อัตราการกลั่นเป็นค่าที่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลง เพราะการที่อัตราการกลั่นลดลงอาจจะมีสาเหตุมาจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกลั่นไม่เหมาะสม จึงทำให้อัตราการกลั่นลดลง ดังนั้นจึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 5 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ปานกลางในการตรวจสอบ/ควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่น

ลักษณะข้อบกพร่อง : มีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ (Demister)

ความรุนแรง (S) : ถ้าหากมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ ซึ่งจะอยู่ในท่อส่งสาร (Line) ระหว่างเครื่องกลั่นเข้ากับเครื่องควบแน่น จะมีผลทำให้สารระเหยไปยังเครื่องควบแน่นได้ช้าลง ทำให้รอบเวลานานขึ้น จึงให้คะแนนความรุนแรงเฉลี่ยเท่ากับ 7.7 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ

จะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนปานกลางค่อนข้างมากถึงค่อนข้างมาก

โอกาสการเกิดขึ้น (O) : สาเหตุที่ทำให้เกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ เพราะไม่ค่อยถอดอุปกรณ์มาทำความสะอาด ซึ่งเกิดขึ้นไม่บ่อยครั้ง ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสการเกิดขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.7 ซึ่งหมายความว่า การมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับมีโอกาสเกิดขึ้น 30 - 49% ของแต่ละรอบการผลิต

การตรวจจับ (D) : การตรวจสอบว่ามีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับหรือไม่นั้น จะทำการตรวจสอบจากอัตราการกลั่น ถ้าหากมีอัตราการกลั่นที่ลดลง จึงจะตั้งข้อสงสัยว่าอาจจะเกิดจากการมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับหรือเครื่องควบแน่น หรือการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ยังไม่เหมาะสม จึงให้คะแนนการตรวจสอบเท่ากับ 5 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้ปานกลางในการตรวจสอบการมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ

ลักษณะข้อบกพร่อง : วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันไม่น่าเชื่อถือ

ความรุนแรง (S) : ผลกระทบจากวิธีการตรวจสอบสารไม่น่าเชื่อถือนั้นส่งผลให้ผลการตรวจสอบไม่น่าเชื่อถือ ซึ่งส่งผลต่อค่าความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันถ้าหากมีการตรวจสอบที่ผิดพลาด ดังนั้นจึงให้คะแนนความรุนแรงเฉลี่ยเท่ากับ 8.7 ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันไม่น่าเชื่อถือ จะส่งผลกระทบต่อค่าความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันค่อนข้างมากถึงมาก

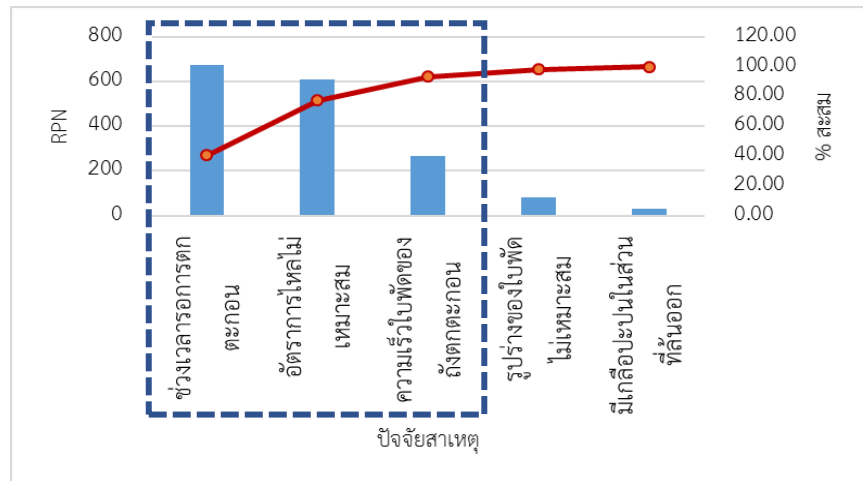
โอกาสการเกิดขึ้น (O) : สาเหตุที่ทำให้การตรวจสอบไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจากไม่ทราบวิธีการตรวจสอบที่ถูกต้องและให้ผลการตรวจที่น่าเชื่อถือ ซึ่งการตรวจสอบจะเกิดขึ้นในทุกๆรอบของการผลิต ดังนั้นจึงให้คะแนนโอกาสในการเกิดขึ้นเท่ากับ 10 ซึ่งหมายความว่า มีความเป็นไปได้มากกว่า 90% ที่วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันไม่น่าเชื่อถือ

การตรวจจับ (D) : การตรวจสอบค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันในปัจจุบันใช้วิธีการกรองแบบลดความดัน (Reduced Pressure Filtration) ซึ่งเป็นการตรวจสอบที่เชื่อถือได้ระดับหนึ่ง จึงให้คะแนนการตรวจสอบเฉลี่ยเท่ากับ 7.3 ซึ่งหมายความว่า มีความเชื่อถือการตรวจสอบความเข้มข้นด้วยการกรองแบบลดความดันต่ำจนถึงต่ำมาก

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ต้องการลดรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน จึงต้องทำการแยกตารางการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ เพื่อทำการปรับปรุงลดรอบเวลาที่ละขั้นตอน การให้คะแนนความรุนแรงของผลกระทบ ความถี่ของการเกิดลักษณะข้อบกพร่อง และความสามารถในการตรวจสอบ/ควบคุมลักษณะข้อบกพร่อง เป็นไปตามตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

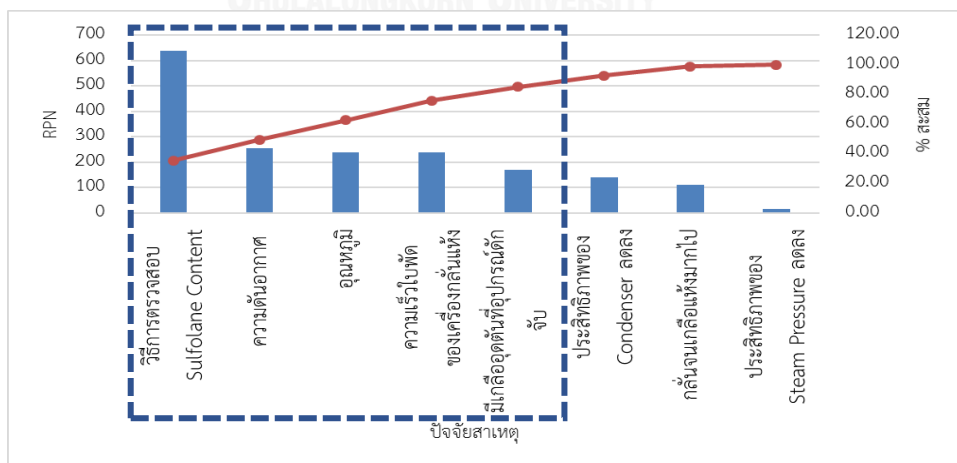
จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ผู้วิจัยสรุปเป็นแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ระหว่างปัจจัยสาเหตุ ค่าเฉลี่ย RPN และร้อยละสะสมของค่า RPN เพื่อทำการคัดเลือกปัจจัยสาเหตุที่มีผลต่อ

รอบเวลาของกระบวนการนำสารกลับคืนตามหลักการของพาเรโต 80 : 20 โดยนำ 80% ของร้อยละสะสมของค่า RPN มาดำเนินการปรับปรุงแก้ไข สาเหตุที่เลือกใช้วิธีการดังกล่าว เนื่องจากสามารถแสดงให้เห็นถึงขนาดของปัญหา จัดลำดับความสำคัญของปัญหาและทำการคัดเลือกปัญหาส่วนใหญ่มาแก้ไข จึงทำให้มั่นใจได้ว่าจะได้แก้ปัญหาส่วนใหญ่ ซึ่งคิดเป็น 80% ของปัญหาทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แผนภูมิพาเรโต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า RPN กับ ปัจจัยสาเหตุ ที่มีผลต่อรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า 80% ของค่า RPN นั้นมีปัจจัยสาเหตุอยู่ 3 ปัจจัย ได้แก่ ช่วงเวลาการตกตะกอน อัตราการไหล (อัตราการไหลของสาร NaCl-Sul) และความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน จึงเลือกปัจจัยทั้ง 3 ไปดำเนินการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ 4.4 แผนภูมิพาเรโต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า RPN กับ ปัจจัยสาเหตุที่มีผลต่อรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า 80% ของค่า RPN นั้นมีปัจจัยสาเหตุอยู่ 5 ปัจจัย ได้แก่ วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน (Sulfolane Content) ความดันอากาศของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง อุณหภูมิของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง และมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ (Demister) จึงเลือกปัจจัยทั้ง 5 ไปดำเนินการปรับปรุงแก้ไข โดยแยกประเภทของปัจจัยเป็นปัจจัยที่ต้องทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม และปัจจัยที่สามารถดำเนินการแก้ไขได้ทันที ปัจจัยที่จะต้องนำไปทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความดันของเครื่องกลั่นแห้ง อุณหภูมิของเครื่องกลั่นแห้ง และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง สำหรับปัจจัยที่สามารถดำเนินการแก้ไขได้ทันทีในขณะนี้ คือ วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน และมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ (Demister)

4.3 สรุปการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

สรุปจำนวนปัจจัยที่ผู้วิจัยสนใจศึกษาตลอดกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน มีทั้งหมด 8 ปัจจัย ผู้วิจัยแบ่งปัจจัยเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปัจจัยที่จะนำไปทำการทดลอง และปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้ทันที สำหรับปัจจัยที่จะนำไปทำการทดลองนั้นได้แก่ ได้แก่ อัตราการไหลของสาร NaCl-Sul ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน ช่วงเวลารอกการตกตะกอน ของขั้นตอนที่ 1 และ ความดันอากาศ อุณหภูมิ ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง ของขั้นตอนที่ 3 ส่วนปัจจัยที่สามารถทำการแก้ไขได้ทันที ได้แก่ วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน ซึ่งในปัจจุบันใช้วิธีการกรองแบบลดความดัน และมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ จะนำไปวิเคราะห์หาสาเหตุและดำเนินการแก้ไขต่อไป

บทที่ 5

การวิเคราะห์สาเหตุและการกำหนดแนวทางในการปรับปรุง

ในบทนี้ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการปรับปรุงเพื่อลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน โดยทำการทดลองเพื่อพิสูจน์หาสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลาอย่างมีนัยสำคัญ และนำผลจากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยต่างๆ ที่มีนัยสำคัญและหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านั้น พร้อมทั้งอธิบายทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนอง โดยใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plots)

5.1 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ ลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน แต่เนื่องจากการลดรอบเวลานั้น อาจส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลาน ซึ่งก็คือ ค่าความเข้มข้นของเกลือในสารซัลโฟลานที่ตรวจสอบหลังจบขั้นตอนที่ 1 และความเข้มข้นของสารซัลโฟลานในเกลือที่ตรวจสอบหลังจบขั้นตอนที่ 3 จึงต้องวิเคราะห์ผลกระทบทั้ง 2 ด้านในแต่ละขั้นตอนไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นตัวแปรตอบสนองที่ต้องทำการศึกษา คือ

- 1) ตัวแปรตอบสนองของขั้นตอนที่ 1 คือ รอบเวลา (y_1) และ ความเข้มข้นของเกลือ (y_2)
- 2) ตัวแปรตอบสนองของขั้นตอนที่ 3 คือ รอบเวลา (y_3) และ ความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน (y_4)

5.2 การกำหนดแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนมาใช้ทำการทดลอง เนื่องจากแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนมีจำนวนครั้งการทดลองน้อยกว่าแบบการทดลองส่วนประสมกลางในกรณีที่มี 3 ปัจจัย แบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนมีจำนวนครั้งการทดลอง 15 การทดลอง แต่แบบการทดลองส่วนประสมกลางมีจำนวนครั้งการทดลอง 20 การทดลอง สำหรับ 3 ปัจจัย นอกจากนี้ยังมีค่า Resolution เท่ากับ IV ซึ่งสามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Interaction Effects) ได้ [7] โดยผลกระทบหลัก (Main Effects) จะปะปน (Confounding) กับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย ซึ่งทำให้ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยปะปนกัน

ระยะเวลาต่อ 1 การทดลองในงานวิจัยนี้ ใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 12 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเลือกแบบการทดลองที่มีจำนวนครั้งการทดลองที่น้อยที่สุดคือแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน แม้ว่าจะมีคุณภาพของผลการทดลองที่ต่ำกว่าแบบการทดลองส่วนประสมกลาง แต่แบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนมีข้อดีที่สามารถหลีกเลี่ยงสภาวะการทดลองที่อาจทำให้ผลตอบสนองมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดมากเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้เครื่องจักรไม่สามารถดำเนินการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง

หลังจากเลือกแบบการทดลองแล้ว จึงสร้างเมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ตามแบบการทดลองที่ได้เลือกไว้ ซึ่งก็คือแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยแบ่งเป็น 2 เมตริกซ์ สำหรับขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการตกตะกอน และขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการกลั่นแห้ง ในการดำเนินการออกแบบการทดลอง ได้นำเอาโปรแกรมมินิแทป (MINITAB) เข้ามาช่วยในการสร้างเมตริกซ์การออกแบบ โดยในงานวิจัยนี้มีปัจจัยที่ต้องการศึกษาทั้งหมด 6 ปัจจัย แบ่งเป็น 3 ปัจจัยของขั้นตอนที่ 1 และ 3 ปัจจัยของขั้นตอนที่ 3 ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีจำนวนครั้งการทดลองเท่ากับ 15 การทดลอง รวมจำนวนครั้งการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้เท่ากับ 30 การทดลอง ดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 โดยมีเมตริกซ์การออกแบบการทดลอง ดังรูปที่ 5.3

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

รูปที่ 5.1 จำนวนครั้งการทดลองโดยโปรแกรม MINITAB

Box-Behnken Design			
Factors:	3	Replicates:	1
Base runs:	15	Total runs:	15
Base blocks:	1	Total blocks:	1
Center points: 3			

รูปที่ 5.2 รายละเอียดการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม MINITAB

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C
1	11	1	2	1	0	-1	1
2	6	2	2	1	1	0	-1
3	15	3	0	1	0	0	0
4	8	4	2	1	1	0	1
5	12	5	2	1	0	1	1
6	10	6	2	1	0	1	-1
7	13	7	0	1	0	0	0
8	4	8	2	1	1	1	0
9	5	9	2	1	-1	0	-1
10	7	10	2	1	-1	0	1
11	2	11	2	1	1	-1	0
12	1	12	2	1	-1	-1	0
13	9	13	2	1	0	-1	-1
14	3	14	2	1	-1	1	0
15	14	15	0	1	0	0	0

รูปที่ 5.3 เมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ของแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน

หมายเหตุ : ชั้นตอนที่ 1 A แทน อัตราการไหลของสาร

ชั้นตอนที่ 3 A แทน ความดัน

B แทน ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน

B แทน อุณหภูมิ

C แทน ช่วงเวลารอกการตกตะกอน

C แทน ความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้ง

5.3 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย

5.3.1 ปัจจัย

ปัจจัยที่นำมาทำการทดลองในงานวิจัยนี้ คือ ปัจจัยที่ผ่านการวิเคราะห์ลักษณะบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) และการคัดเลือกด้วยหลักการพาเรโต ซึ่งแสดงรายละเอียดในบทที่ 4 ปัจจัยที่นำมาทำการทดลองในชั้นตอนที่ 1 ได้แก่ อัตราการไหลของสาร ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน และช่วงเวลารอกการตกตะกอน ปัจจัยที่นำมาทำการทดลองในชั้นตอนที่ 3 ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้ง

สำหรับปัจจัยประเภทที่สามารถทำการปรับปรุงได้ทันทีในชั้นตอนที่ 3 ได้ทำการแก้ไขก่อนเริ่มทำการทดลอง ซึ่งมี 2 ปัจจัย ได้แก่ วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน ซึ่งได้ทำการแก้ไขโดยส่งไปตรวจสอบที่ห้องทดลองนอกโรงงาน และการมีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ ได้ทำการแก้ไขโดยจัดให้มีการถอดอุปกรณ์ดักจับมาทำความสะอาดเดือนละครั้ง

5.3.2 ระดับของปัจจัย

ในการทดลองนี้กำหนดระดับของปัจจัย (Levels) โดยอาศัยความรู้พื้นฐานช่วงการใช้งานจริงและความสามารถของเครื่องจักร งานวิจัยนี้ใช้แบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ในการวิเคราะห์ ดังนั้นปัจจัยแต่ละปัจจัยจะถูกทดลองที่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) กลาง (0) และสูง (+1) แสดงในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ระดับของปัจจัยในสภาวะปัจจุบันและระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนที่ 1

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	หน่วย	สภาวะปัจจุบันของเครื่องจักร	ระดับของปัจจัย		
				ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
F	อัตราการไหล	กิโลกรัม/ชั่วโมง	500 – 1,200	500	850	1,200
L	ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน	รอบ/นาที	0.5 - 4	0.5	2.25	4
S	ช่วงเวลารอกการตกตะกอน	ชั่วโมง	1	0	0.5	1

ตารางที่ 5.2 ระดับของปัจจัยในสภาวะปัจจุบันและระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนที่ 3

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	หน่วย	สภาวะปัจจุบันของเครื่องจักร	ระดับของปัจจัย		
				ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
P	ความดัน	mbar	30 – 60	30	45	60
T	อุณหภูมิ	°C	160 – 200	160	180	200
V	ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง	รอบ/นาที	20	10	15	20

การกำหนดระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนที่ 1 สำหรับปัจจัยแรกคือ “อัตราการไหล (F)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 500 – 1,200 กิโลกรัม/ชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงการปฏิบัติงานในปัจจุบัน จึงกำหนดขอบเขตการทดลองให้อยู่ในช่วงดังกล่าว ปัจจัยต่อมาคือ “ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (L)” สาเหตุที่กำหนดกำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0.5 – 4 รอบ/นาที เนื่องจากเป็นช่วงการปฏิบัติงานในปัจจุบัน จึงกำหนดขอบเขตการทดลองให้อยู่ในช่วง

ดังกล่าว ดังนั้นการกำหนดระดับต่ำของการทดลองจึงกำหนดให้เท่ากับความเร็วในสภาวะปัจจุบัน และการกำหนดระดับสูงของการทดลองได้ทำการกำหนดให้มีค่ามากที่สุดที่เครื่องจักรสามารถตั้งค่าได้ ปัจจัยสุดท้ายคือ “ช่วงเวลารอกการตกตะกอน (S)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0 – 1 ชั่วโมง เนื่องจากการตั้งค่าในสภาวะปัจจุบันอยู่ที่ 1 ชั่วโมงทุกรอบการผลิต ถ้าหากต้องการลดรอบเวลาของขั้นตอน จึงต้องกำหนดให้ช่วงเวลารอกการตกตะกอนต่ำลง ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้กำหนดระดับต่ำของการทดลองให้เท่ากับ 0 ชั่วโมง เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่ไม่จำเป็นต้องรอกตะกอนเลย และกำหนดระดับสูงของการทดลองให้เท่ากับสภาวะปัจจุบัน

การกำหนดระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนที่ 3 สำหรับปัจจัยแรกคือ “ความดัน (P)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 30 – 60 mbar เนื่องจากเป็นช่วงปฏิบัติงานในปัจจุบัน ซึ่ง 30 mbar เป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่เครื่องจักรสามารถตั้งค่าได้ ปัจจัยต่อมาคือ “อุณหภูมิ (T)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ช่วง 160 – 200 °C เนื่องจากเป็นช่วงปฏิบัติงานในปัจจุบัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมกับความดันตามสมการ Antoine สำหรับปัจจัยสุดท้ายคือ “ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (V)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 10 – 20 รอบ/นาที เนื่องจากการตั้งค่าความเร็วใบพัดในสภาวะปัจจุบันอยู่ที่ 20 รอบ/นาที ซึ่งเป็นการตั้งค่าที่สูงที่สุดของเครื่องจักร สาเหตุที่ต้องตั้งค่าสูงสุดเพราะคาดว่าสารที่อยู่ในเครื่องกลั่นแห้งน่าจะมีลักษณะเป็นของหนืดค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องค่าสูงสุดเพื่อให้มีแรงในการคนสาร แต่อาจจะมีความเป็นไปได้ว่าสารที่อยู่ในเครื่องกลั่นแห้งนั้นไม่ได้มีลักษณะเป็นของหนืดมากตามที่คาดการณ์ไว้ จึงกำหนดให้ระดับต่ำของการทดลองเท่ากับ 10 รอบ/นาที ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางที่เครื่องจักรสามารถตั้งค่าได้

5.4 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามเมตริกซ์การออกแบบที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น โดยทำการทดลองทีละขั้นตอน เริ่มที่ขั้นตอนที่ 1 ก่อน จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในขั้นตอนที่ 1 เพื่อนำสภาวะที่เหมาะสมนั้นมาใช้ในการทำการทดลองในขั้นตอนที่ 3 ก่อนการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยได้มีการประชุมเพื่ออธิบายทำความเข้าใจกับสมาชิกในทีมเกี่ยวกับขั้นตอนดำเนินการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องจัดเตรียมตั้งค่าเครื่องจักรได้อย่างถูกต้องตามสภาวะการทดลองที่ได้กำหนดไว้ โดยมีขั้นตอนดำเนินการทดลอง ดังนี้

1. ปรับการตั้งค่าของเครื่องจักรผ่านเครื่องควบคุมให้ได้ตามสภาวะการทดลองที่ได้กำหนดไว้ในลำดับการทดลองจากโปรแกรม MINITAB
2. เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนแล้ว จึงอ่านข้อมูลของเวลาที่ใช้ในการผลิตในแต่ละการทดลองจากจอมอนิเตอร์ (Monitor)

3. สำหรับการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของเกลือในขั้นตอนที่ 1 และการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันในขั้นตอนที่ 3 จะนำตัวอย่างสารบางส่วนส่งไปตรวจสอบที่ห้องทดลองนอกโรงงาน

5.5 ผลการทดลอง

หลังจากดำเนินการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นแล้วนั้น ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.3 และตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 1

การทดลองที่	ตัวแปร			รอบเวลา (ชม.)	ค่าความเข้มข้นของเกลือ (%)
	F (กก./ชม.)	L (รอบ/นาที)	S (ชม.)		
1	850	0.5	1	12.2	0.7
2	1200	2.25	0	9.1	0.89
3	500	2.25	1	16.1	0.68
4	1200	2.25	1	10	0.9
5	850	0.5	0	10.5	0.53
6	850	4	0	11.9	0.9
7	850	2.25	0.5	11	0.81
8	500	2.25	0	13.3	0.61
9	500	0.5	0.5	15.9	0.5
10	500	4	0.5	16.3	0.8
11	850	2.25	0.5	11.2	0.87
12	850	4	1	12.2	0.96
13	1200	4	0.5	9.6	1.17
14	1200	0.5	0.5	9.5	0.73
15	850	2.25	0.5	11.4	0.89

หมายเหตุ : ขั้นตอนที่ 1 F แทน อัตราการไหลของสาร

L แทน ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน

S แทน ช่วงเวลารอการตกตะกอน

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 3

การทดลองที่	ตัวแปร			รอบเวลา (ชม.)	ค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน (%)
	P (mbar)	T (°C)	V (รอบ/นาที)		
1	45	160	20	12.7	1.92
2	30	180	10	10.7	1.02
3	60	180	20	12.5	2.79
4	30	160	15	11	1.22
5	45	180	15	11.5	1.53
6	45	200	10	13.1	1.46
7	60	160	15	14.9	3.13
8	45	160	10	13.8	1.96
9	30	180	20	10	0.82
10	60	200	15	14.2	1.78
11	45	200	20	12.2	1.44
12	45	180	15	11.4	1.72
13	45	180	15	11.6	1.55
14	30	200	15	11.5	1.32
15	60	180	10	13.6	2.86

หมายเหตุ : ขั้นตอนที่ 3 P แทน ความดัน

T แทน อุณหภูมิ

V แทน ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง

5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

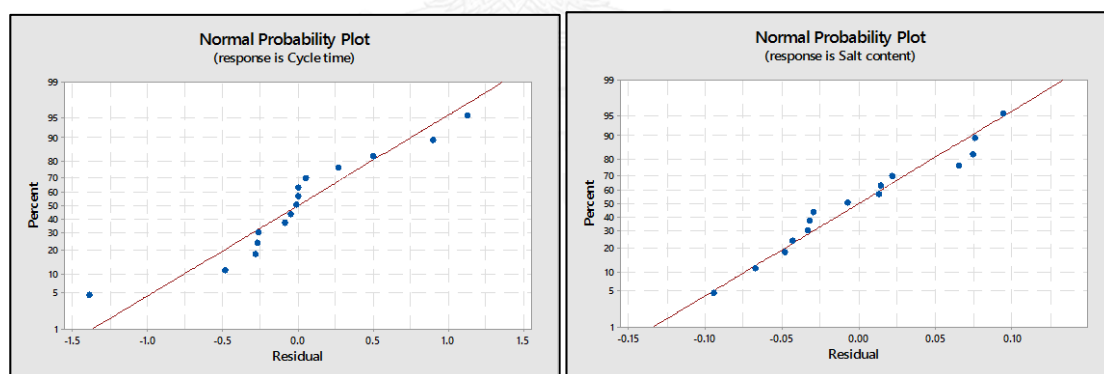
ในการขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาว่าปัจจัยใดมีผลกระทบกับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ จะต้องทำการตรวจสอบสมมติฐานก่อนว่า ข้อมูลมีลักษณะที่เหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือไม่

5.6.1 การตรวจสอบสมมติฐาน

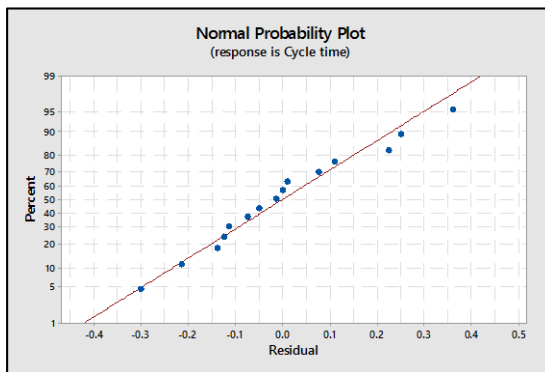
การตรวจสอบสมมติฐานของการทดลองจะทำการตรวจสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับค่าตกค้าง (Residual) ของการทดลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ สมมติฐานการแจกแจงปกติ สมมติฐานของความเป็นอิสระ และสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่

1) การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

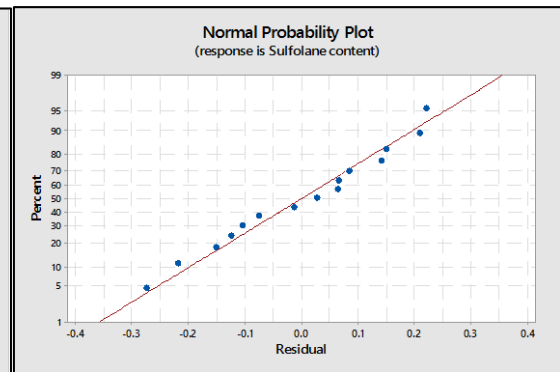
การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ คือค่าตกค้างต้องมีการแจกแจงปกติ สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งจะต้องมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือเป็นเส้นตรง รูปที่ 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7 แสดงถึงข้อมูลที่เป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ



รูปที่ 5.4 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจง รูปที่ 5.5 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของรอบเวลาขั้นตอนที่ 1 ปกติของค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1



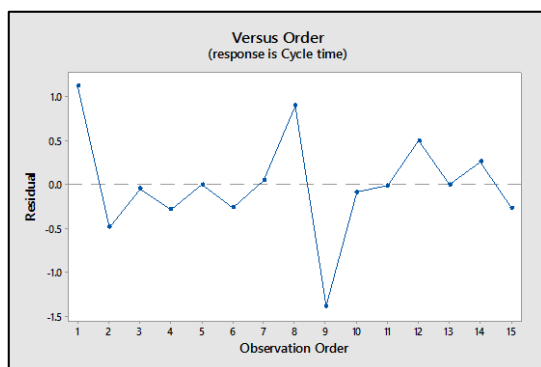
รูปที่ 5.6 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของรอบเวลาขั้นตอนที่ 3



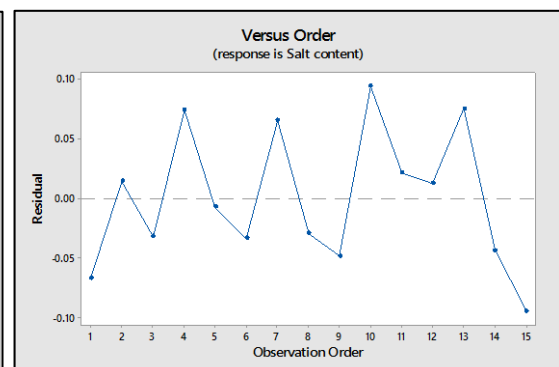
รูปที่ 5.7 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3

2) การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Assumption)

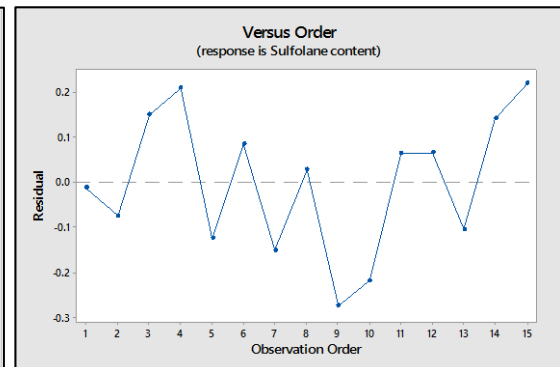
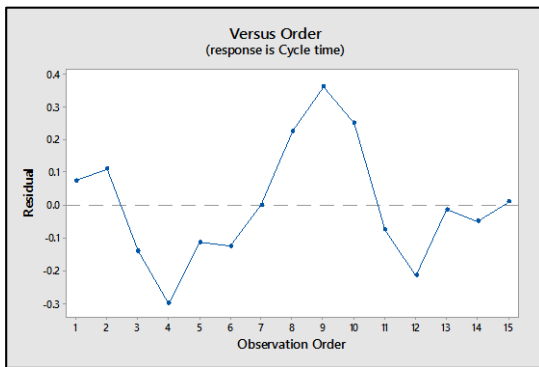
การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล คือค่าตกค้างจะต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน สามารถตรวจสอบได้จากการพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและลำดับข้อมูล (Order) โดยการกระจายตัวของค่าตกค้างควรมีรูปแบบที่มีอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้ม รูปที่ 5.8, 5.10 และ 5.11 แสดงถึงข้อมูลที่มีการกระจายตัวที่เป็นอิสระ ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน สำหรับรูปที่ 5.9 เมื่อพิจารณาค่าตกค้าง ตั้งแต่ลำดับการทดลองที่ 4 – 9 จะเห็นความเป็นแนวโน้ม คือ ขึ้น-ลง-ลง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตัวแปรอัตราไหล (F) ของการทดลองที่ 4 – 9 ในตารางผลการทดลองที่ 5.3 จะเห็นรูปแบบของระดับปัจจัยที่ตั้งไว้คือ สูง-กลาง-กลาง และ กลาง-ต่ำ-ต่ำ จึงเป็นผลให้กราฟรูปที่ 5.9 มีลักษณะเป็นแนวโน้ม



รูปที่ 5.8 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูลของรอบเวลาขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 5.9 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูลของค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1

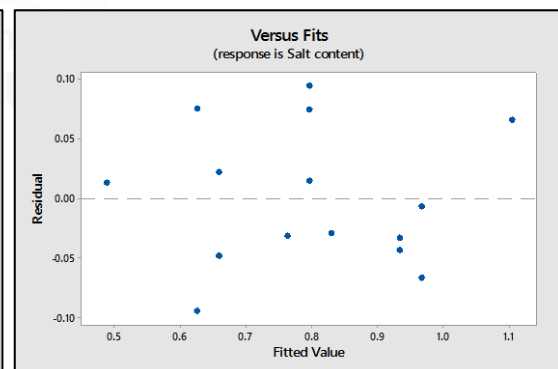
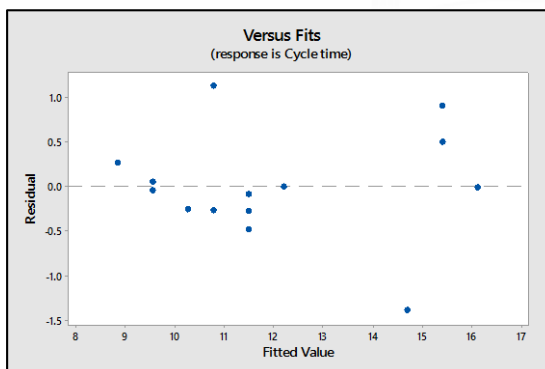


รูปที่ 5.10 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูล
ของรอบเวลาขั้นตอนที่ 3

รูปที่ 5.11 กราฟค่าตกค้างกับลำดับข้อมูลของค่า
ความเข้มข้นสารซัลโฟลันในขั้นตอนที่ 3

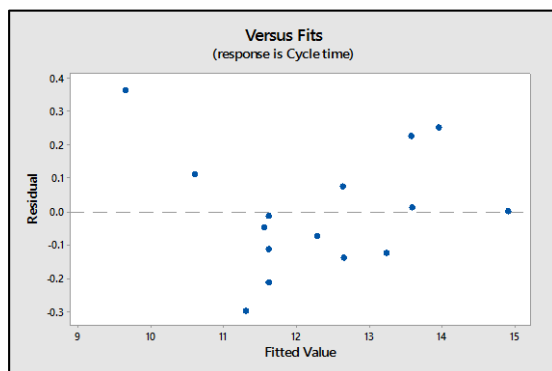
3) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability)

การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ คือค่าตกค้างจะต้องมีค่าความแปรปรวนคงที่ สามารถตรวจสอบได้โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและค่าประมาณข้อมูล (Fitted Value) ซึ่งข้อมูลที่แสดงในกราฟควรมีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่ควรมีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปกรวยปากเปิด รูปที่ 5.12, 5.13, 5.14 และ 5.15 แสดงถึงข้อมูลที่ไม่ีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบกรวยปากเปิด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

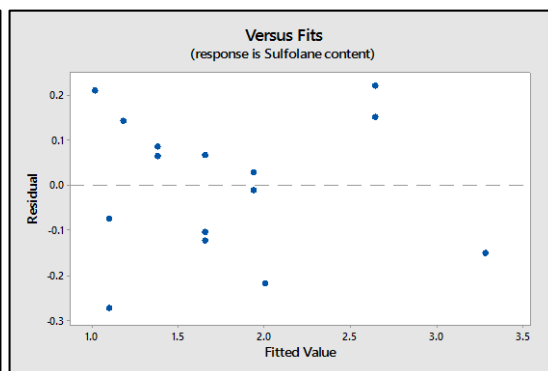


รูปที่ 5.12 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณ
ข้อมูลของรอบเวลาขั้นตอนที่ 1

รูปที่ 5.13 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณ
ข้อมูลของค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 5.14 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณ
ข้อมูลของรอบเวลาขั้นตอนที่ 3



รูปที่ 5.15 กราฟค่าตกค้างกับค่าประมาณ
ข้อมูลของค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานใน
ขั้นตอนที่ 3

5.6.2 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยนั้นได้ใช้โปรแกรม MINITAB เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ โดยผู้วิจัยได้เลือก Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) มาทำการทดสอบหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระในแต่ละพจน์ของสมการความสัมพันธ์ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรม MINITAB ซึ่งนัยสำคัญทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวพิจารณาได้จากค่า P-value หากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แล้วแสดงว่าตัวแปรอิสระนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ

การหาสมการความสัมพันธ์จะแสดงในรูปแบบสมการถดถอยแบบกำลังสอง (Second-order Polynomial Regression) คุณภาพของสมการความสัมพันธ์จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ถ้าหากตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูง (R^2 ประมาณ 0.8) แสดงว่าสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี และมีความแม่นยำในการทำนายค่าตัวแปรตอบสนอง [22] นอกจากนั้นยังทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit Test ; LOF) ซึ่งจะทำการประเมินที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองที่ได้ต่างกัน ซึ่งมักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยการทดสอบ LOF นี้ ถ้า P-value ของ LOF มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) หมายความว่า สมการความสัมพันธ์นั้นมีความเหมาะสมแล้ว [7]

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์แบบ Multiple Regression Analysis มี 3 ข้อด้วยกัน ได้แก่ [23]

- 1) ควรใช้ขนาดตัวอย่าง (n) จำนวนมาก ซึ่งควรมีขนาดตัวอย่างในการวิเคราะห์การถดถอย ไม่น้อยกว่า 20 เท่าของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตอบสนอง [24]
- 2) ระดับของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย มีข้อกำหนดชัดเจนว่า ตัวแปรตอบสนองนั้นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงปริมาณหรือตัวแปรทวิ (Dummy Variable) ที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ถ้าข้อมูลเป็นข้อมูลเชิงกลุ่มจะต้องแปลงข้อมูลเป็นตัวแปรทวิ แล้วจึงนำมาเข้าสมการวิเคราะห์การถดถอยต่อไป
- 3) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระด้วยกันจะต้องมีค่าต่ำ ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมีค่าสูงหรือไม่เป็นอิสระต่อกัน จะทำให้เกิดปัญหา Multicollinearity ซึ่งทำให้การทดสอบสถิติค่า F และค่า T ไม่สอดคล้องกัน ค่าสถิติ T จะไม่มีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าสถิติค่า F ใน ANOVA จะมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าผลการวิเคราะห์ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงหรือค่า F สูง ก็อาจจะพบว่าเกิดปัญหา Multicollinearity ได้เหมือนกัน [25] สำหรับการตรวจสอบนั้นจะใช้ค่า VIF (Variance Inflation) ถ้าค่า VIF ทุกค่าของตัวแปรตอบสนองบนตัวแปรอิสระมีมากกว่า 10 จะต้องระวังความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือเกิดปัญหา Multicollinearity [26] ถ้าพบว่า VIF มีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรอิสระตัวที่ i มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระอื่นๆมาก

5.6.2.1 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1

Response Surface Regression: Cycle time versus Flow, Agitator, Sediment						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	9	79.4348	8.82609	28.99	0.001	
Linear	3	11.2101	3.73670	12.27	0.010	
Flow	1	7.4899	7.48989	24.60	0.004	
Agitator	1	0.1642	0.16423	0.54	0.496	
Sediment	1	2.0447	2.04471	6.71	0.049	
Square	3	5.0623	1.68744	5.54	0.048	
Flow*Flow	1	3.8792	3.87923	12.74	0.016	
Agitator*Agitator	1	1.3292	1.32923	4.37	0.091	
Sediment*Sediment	1	0.0369	0.03692	0.12	0.742	
2-Way Interaction	3	1.4150	0.47167	1.55	0.312	
Flow*Agitator	1	0.0225	0.02250	0.07	0.797	
Flow*Sediment	1	0.9025	0.90250	2.96	0.146	
Agitator*Sediment	1	0.4900	0.49000	1.61	0.260	
Error	5	1.5225	0.30450			
Lack-of-Fit	3	1.4425	0.48083	12.02	0.078	
Pure Error	2	0.0800	0.04000			
Total	14	80.9573				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0.551815	98.12%	94.73%	71.27%			
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	22.39	2.07	10.83	0.000		
Flow	-0.02095	0.00422	-4.96	0.004	57.42	
Agitator	-0.442	0.602	-0.73	0.496	29.12	
Sediment	5.03	1.94	2.59	0.049	24.77	
Flow*Flow	0.000008	0.000002	3.57	0.016	52.13	
Agitator*Agitator	0.1959	0.0938	2.09	0.091	15.34	
Sediment*Sediment	-0.40	1.15	-0.35	0.742	9.68	
Flow*Agitator	-0.000122	0.000450	-0.27	0.797	16.10	
Flow*Sediment	-0.00271	0.00158	-1.72	0.146	14.80	
Agitator*Sediment	-0.400	0.315	-1.27	0.260	6.31	
Regression Equation in Uncoded Units						
Cycle time = 22.39 - 0.02095 Flow - 0.442 Agitator + 5.03 Sediment						
+ 0.000008 Flow*Flow + 0.1959 Agitator*Agitator - 0.40 Sediment*Sediment						
- 0.000122 Flow*Agitator - 0.00271 Flow*Sediment - 0.400 Agitator*Sediment						

รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 5.16 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1 ได้สมการที่ 5.1 ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (L) พจน์กำลังสองของความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (L^2) พจน์กำลังสองของช่วงเวลารอการตกตะกอน (S^2) พจน์ผลกระทบรวมระหว่างอัตราการไหลและความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (FL) พจน์ผลกระทบรวมระหว่างอัตราการไหลและช่วงเวลารอการตกตะกอน (FS) และพจน์

ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนและช่วงเวลารอกการตกตะกอน (LS) ดังนั้นจึงนำวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) มาใช้ เพื่อทดสอบหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 และนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้นมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduced Model) ต่อไป

$$\text{Cycle Time } (y_1) = 22.39 - 0.02095F - 0.442L + 5.03S + 0.000008F^2 + 0.1959L^2 - 0.4S^2 - 0.000122FL - 0.00271FS - 0.4LS \quad (5.1)$$

Response Surface Regression: Cycle time versus Flow, Agitator, Sediment						
Backward Elimination of Terms						
α to remove = 0.05						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	3	76.1600	25.3867	58.21	0.000	
Linear	2	13.3338	6.6669	15.29	0.001	
Flow	1	9.2725	9.2725	21.26	0.001	
Sediment	1	4.0612	4.0612	9.31	0.011	
Square	1	3.6538	3.6538	8.38	0.015	
Flow*Flow	1	3.6538	3.6538	8.38	0.015	
Error	11	4.7973	0.4361			
Lack-of-Fit	9	4.7173	0.5241	13.10	0.073	
Pure Error	2	0.0800	0.0400			
Total	14	80.9573				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
	0.660394	94.07%	92.46%	87.49%		
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	23.71	1.94	12.22	0.000		
Flow	-0.02209	0.00479	-4.61	0.001	51.55	
Sediment	1.425	0.467	3.05	0.011	1.00	
Flow*Flow	0.000008	0.000003	2.89	0.015	51.55	
Regression Equation in Uncoded Units						
Cycle time = 23.71 - 0.02209 Flow + 1.425 Sediment + 0.000008 Flow*Flow						

รูปที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1
โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากรูปที่ 5.17 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์แบบลดตัวแปรอิสระ สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 1 แสดงให้เห็นว่าพจน์ที่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ อัตราการไหล (F) ช่วงเวลารอกการตกตะกอน (S) และพจน์กำลังสองของอัตราการไหล (F^2) ในขณะที่ไม่มีพจน์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยใดมีนัยสำคัญต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 5.2 โดยที่ มีค่า P-Value ของ Lack-of-Fit = 0.073

มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่า สมการที่ 5.2 ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นกำลังสอง มีความเหมาะสมแล้ว จากผลลัพธ์ $R^2 = 94.07\%$ แสดงว่าสมการที่ 5.2 สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี มีความแม่นยำในการทำนายค่าตัวแปรตอบสนอง จึงถือว่าสมการความสัมพันธ์นี้มีความเหมาะสม สำหรับค่า VIF ของ F และ F^2 มีค่ามากกว่า 10 หมายความว่า ทั้งสองพจน์มีความสัมพันธ์กันเอง ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระเดียวกันจึงทำให้มีความสัมพันธ์กัน

$$\text{Cycle Time } (y_1) = 23.71 - 0.02209F + 1.425S + 0.000008F^2 \quad (5.2)$$



5.6.2.2 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือ

Response Surface Regression: Salt content versus Flow, Agitator, Sediment						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	9	0.348732	0.038748	3.59	0.087	
Linear	3	0.028577	0.009526	0.88	0.510	
Flow	1	0.002575	0.002575	0.24	0.646	
Agitator	1	0.016852	0.016852	1.56	0.267	
Sediment	1	0.004619	0.004619	0.43	0.542	
Square	3	0.013232	0.004411	0.41	0.754	
Flow*Flow	1	0.002385	0.002385	0.22	0.658	
Agitator*Agitator	1	0.010016	0.010016	0.93	0.380	
Sediment*Sediment	1	0.000016	0.000016	0.00	0.971	
2-Way Interaction	3	0.024825	0.008275	0.77	0.560	
Flow*Agitator	1	0.004900	0.004900	0.45	0.531	
Flow*Sediment	1	0.016900	0.016900	1.56	0.266	
Agitator*Sediment	1	0.003025	0.003025	0.28	0.619	
Error	5	0.054042	0.010808			
Lack-of-Fit	3	0.051175	0.017058	11.90	0.079	
Pure Error	2	0.002867	0.001433			
Total	14	0.402773				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.103963	86.58%	62.43%	0.00%		
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	0.664	0.389	1.71	0.149		
Flow	-0.000388	0.000796	-0.49	0.646	57.42	
Agitator	0.142	0.113	1.25	0.267	29.12	
Sediment	-0.239	0.366	-0.65	0.542	24.77	
Flow*Flow	0.000000	0.000000	0.47	0.658	52.13	
Agitator*Agitator	-0.0170	0.0177	-0.96	0.380	15.34	
Sediment*Sediment	-0.008	0.216	-0.04	0.971	9.68	
Flow*Agitator	0.000057	0.000085	0.67	0.531	16.10	
Flow*Sediment	0.000371	0.000297	1.25	0.266	14.80	
Agitator*Sediment	-0.0314	0.0594	-0.53	0.619	6.31	
Regression Equation in Uncoded Units						
Salt content = 0.664 - 0.000388 Flow + 0.142 Agitator - 0.239 Sediment						
+ 0.000000 Flow*Flow - 0.0170 Agitator*Agitator - 0.008 Sediment*Sediment						
+ 0.000057 Flow*Agitator + 0.000371 Flow*Sediment						
- 0.0314 Agitator*Sediment						

รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 5.18 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1 ได้สมการที่ 5.3 ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไม่มีพจน์ใดที่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงนำวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) มาใช้

เพื่อทดสอบหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1 และนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้นมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduced Model) ต่อไป

$$\text{Salt Content } (y_2) = 0.664 - 0.000388F + 0.142L - 0.239S - 0.017L^2 - 0.008S^2 + 0.000057FL + 0.000371FS - 0.0314LS \quad (5.3)$$

Response Surface Regression: Salt content versus Flow, Agitator, Sediment						
Backward Elimination of Terms						
α to remove = 0.05						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	2	0.385862	0.192931	50.44	0.000	
Linear	2	0.385862	0.192931	50.44	0.000	
Flow	1	0.151250	0.151250	39.54	0.000	
Agitator	1	0.234612	0.234612	61.34	0.000	
Error	12	0.045897	0.003825			
Lack-of-Fit	10	0.042431	0.004243	2.45	0.325	
Pure Error	2	0.003467	0.001733			
Total	14	0.431760				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
	0.0618449	89.37%	87.60%	84.12%		
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	0.2419	0.0622	3.89	0.002		
Flow	0.000393	0.000062	6.29	0.000	1.00	
Agitator	0.0979	0.0125	7.83	0.000	1.00	
Regression Equation in Uncoded Units						
Salt content = 0.2419 + 0.000393 Flow + 0.0979 Agitator						

รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1 โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากรูปที่ 5.19 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์แบบลดตัวแปรอิสระ สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1 แสดงให้เห็นว่าพจน์ที่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นเกลือในขั้นตอนที่ 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ อัตราการไหล (F) ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (L) ในขณะที่ไม่มีพจน์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยใดมีนัยสำคัญต่อค่าความเข้มข้นเกลือ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 5.4 โดยที่ มีค่า P-Value ของ Lack-of-Fit = 0.325 มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่า สมการที่ 5.4 ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้น มีความเหมาะสมแล้ว จากผลลัพธ์ $R^2 = 89.37\%$ แสดงว่าสมการที่ 5.4 สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี มีความแม่นยำในการทำนายค่าตัวแปรตอบสนอง จึงถือว่าสมการความสัมพันธ์นี้มีความเหมาะสม สำหรับค่า

VIF ของ F และ L มีค่าน้อยกว่า 10 หมายความว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรอิสระหรือไม่
เกิดปัญหา Multicollinearity

$$\text{Salt Content } (y_2) = 0.2419 + 0.000393F + 0.0979L \quad (5.4)$$



5.6.2.3 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3

Response Surface Regression: Cycle time versus Pressure, Temp, Agitator						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	9	26.9473	2.99415	45.37	0.000	
Linear	3	7.1385	2.37951	36.05	0.001	
Pressure	1	0.5066	0.50664	7.68	0.039	
Temp	1	5.8644	5.86442	88.85	0.000	
Agitator	1	0.0584	0.05840	0.88	0.390	
Square	3	6.4873	2.16244	32.76	0.001	
Pressure*Pressure	1	0.0208	0.02077	0.31	0.599	
Temp*Temp	1	6.4823	6.48231	98.22	0.000	
Agitator*Agitator	1	0.0577	0.05769	0.87	0.393	
2-Way Interaction	3	0.4100	0.13667	2.07	0.223	
Pressure*Temp	1	0.3600	0.36000	5.45	0.067	
Pressure*Agitator	1	0.0400	0.04000	0.61	0.471	
Temp*Agitator	1	0.0100	0.01000	0.15	0.713	
Error	5	0.3300	0.06600			
Lack-of-Fit	3	0.3100	0.10333	10.33	0.090	
Pure Error	2	0.0200	0.01000			
Total	14	27.2773				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
	0.256905	98.79%	96.61%	81.65%		
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	111.5	12.2	9.15	0.000		
Pressure	0.2700	0.0975	2.77	0.039	259.00	
Temp	-1.164	0.123	-9.43	0.000	739.00	
Agitator	-0.275	0.292	-0.94	0.390	259.00	
Pressure*Pressure	0.000333	0.000594	0.56	0.599	79.01	
Temp*Temp	0.003313	0.000334	9.91	0.000	703.01	
Agitator*Agitator	0.00500	0.00535	0.93	0.393	79.01	
Pressure*Temp	-0.001000	0.000428	-2.34	0.067	181.00	
Pressure*Agitator	-0.00133	0.00171	-0.78	0.471	37.00	
Temp*Agitator	0.00050	0.00128	0.39	0.713	181.00	
Regression Equation in Uncoded Units						
Cycle time = 111.5 + 0.2700 Pressure - 1.164 Temp - 0.275 Agitator						
+ 0.000333 Pressure*Pressure + 0.003313 Temp*Temp						
+ 0.00500 Agitator*Agitator - 0.001000 Pressure*Temp						
- 0.00133 Pressure*Agitator + 0.00050 Temp*Agitator						

รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3

จากรูปที่ 5.20 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3 ได้สมการที่ 5.5 ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (V) พจน์กำลังสองของความดัน (P^2) พจน์กำลังสองของความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (V^2) พจน์ผลกระทบรวมระหว่างความดันและอุณหภูมิ (PT) พจน์ผลกระทบ

ร่วมระหว่างความดันและความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (PV) และพจน์ผลกระทบรวมระหว่างอุณหภูมิและความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (TV) ดังนั้นจึงนำวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) มาใช้ เพื่อทดสอบหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 และนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้นมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduced Model) ต่อไป

$$\text{Cycle Time } (y_3) = 111.5 + 0.27P - 1.164T - 0.275V + 0.000333P^2 + 0.003313T^2 + 0.005V^2 - 0.001PT - 0.00133PV + 0.0005TV \quad (5.5)$$

Response Surface Regression: Cycle time versus Pressure, Temp, Agitator						
Backward Elimination of Terms						
α to remove = 0.05						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	5	26.8238	5.36475	106.45	0.000	
Linear	3	9.4411	3.14705	62.45	0.000	
Pressure	1	0.8658	0.86577	17.18	0.003	
Temp	1	5.8651	5.86513	116.38	0.000	
Agitator	1	1.8050	1.80500	35.82	0.000	
Square	1	6.4138	6.41376	127.27	0.000	
Temp*Temp	1	6.4138	6.41376	127.27	0.000	
2-Way Interaction	1	0.3600	0.36000	7.14	0.026	
Pressure*Temp	1	0.3600	0.36000	7.14	0.026	
Error	9	0.4536	0.05040			
Lack-of-Fit	7	0.4336	0.06194	6.19	0.146	
Pure Error	2	0.0200	0.01000			
Total	14	27.2773				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.224492	98.34%	97.41%	93.33%		
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	108.18	9.86	10.97	0.000		
Pressure	0.2800	0.0676	4.14	0.003	163.00	
Temp	-1.143	0.106	-10.79	0.000	713.29	
Agitator	-0.0950	0.0159	-5.98	0.000	1.00	
Temp*Temp	0.003277	0.000290	11.28	0.000	695.29	
Pressure*Temp	-0.001000	0.000374	-2.67	0.026	181.00	
Regression Equation in Uncoded Units						
Cycle time = 108.18 + 0.2800 Pressure - 1.143 Temp - 0.0950 Agitator + 0.003277 Temp*Temp - 0.001000 Pressure*Temp						

รูปที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3

โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากรูปที่ 5.21 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์แบบลดตัวแปรอิสระ สำหรับรอบเวลาในขั้นตอนที่ 3 แสดงให้เห็นว่าพจน์ที่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ

0.05 ได้แก่ ความดัน (P) อุณหภูมิ (T) ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง (V) พจน์กำลังสองของ อุณหภูมิ (T^2) และพจน์ผลกระทบบร่วมระหว่างความดันและอุณหภูมิ (PT) ซึ่งสามารถเขียนสมการ ความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 5.6 โดยที่ มีค่า P-Value ของ Lack-of-Fit = 0.146 มากกว่าระดับ นัยสำคัญ 0.05 หมายความว่า สมการที่ 5.6 ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นกำลังสอง มีความเหมาะสมแล้ว จากผลลัพธ์ $R^2 = 98.34\%$ แสดงว่าสมการที่ 5.6 สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี มีความ แม่นยำในการทำนายค่าตัวแปรตอบสนอง จึงถือว่าสมการความสัมพันธ์นี้มีความเหมาะสม สำหรับค่า VIF ของ P, T, T^2 และ PT มีค่ามากกว่า 10 หมายความว่า ทั้งสี่พจน์มีความสัมพันธ์กันเอง เนื่องจาก P และ T มีความสัมพันธ์ตามสมการ Antoine

$$\text{Cycle Time } (y_3) = 108.18 + 0.28P - 1.143T - 0.095V + 0.003277T^2 - 0.001PT \quad (5.6)$$



5.6.2.4 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลาน

Response Surface Regression: Sulfolane content versus Pressure, Temp, Agitator						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	9	6.12462	0.680513	11.51	0.008	
Linear	3	0.23171	0.077237	1.31	0.369	
Pressure	1	0.21162	0.211623	3.58	0.117	
Temp	1	0.00001	0.000009	0.00	0.991	
Agitator	1	0.00768	0.007683	0.13	0.733	
Square	3	0.18539	0.061797	1.05	0.449	
Pressure*Pressure	1	0.17871	0.178708	3.02	0.143	
Temp*Temp	1	0.00667	0.006669	0.11	0.751	
Agitator*Agitator	1	0.01018	0.010177	0.17	0.695	
2-Way Interaction	3	0.52995	0.176650	2.99	0.135	
Pressure*Temp	1	0.52563	0.525625	8.89	0.031	
Pressure*Agitator	1	0.00423	0.004225	0.07	0.800	
Temp*Agitator	1	0.00010	0.000100	0.00	0.969	
Error	5	0.29562	0.059125			
Lack-of-Fit	3	0.27382	0.091275	8.37	0.109	
Pure Error	2	0.02180	0.010900			
Total	14	6.42024				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.243156	95.40%	87.11%	31.00%		
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	-1.5	11.5	-0.13	0.898		
Pressure	0.1745	0.0922	1.89	0.117	259.00	
Temp	0.001	0.117	0.01	0.991	739.00	
Agitator	-0.100	0.277	-0.36	0.733	259.00	
Pressure*Pressure	0.000978	0.000562	1.74	0.143	79.01	
Temp*Temp	0.000106	0.000316	0.34	0.751	703.01	
Agitator*Agitator	0.00210	0.00506	0.41	0.695	79.01	
Pressure*Temp	-0.001208	0.000405	-2.98	0.031	181.00	
Pressure*Agitator	0.00043	0.00162	0.27	0.800	37.00	
Temp*Agitator	0.00005	0.00122	0.04	0.969	181.00	
Regression Equation in Uncoded Units						
Sulfolane content = -1.5 + 0.1745 Pressure + 0.001 Temp - 0.100 Agitator						
+ 0.000978 Pressure*Pressure + 0.000106 Temp*Temp						
+ 0.00210 Agitator*Agitator - 0.001208 Pressure*Temp						
+ 0.00043 Pressure*Agitator + 0.00005 Temp*Agitator						

รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3

จากรูปที่ 5.22 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 ได้สมการที่ 5.7 ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความดัน (P) อุณหภูมิ (T) ความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้ง (V) พจน์กำลังสองของความดัน (P^2) พจน์กำลังสองของอุณหภูมิ (T^2) พจน์กำลังสองของความเร็วใบพัดของ

เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (V^2) พจน์ผลกระทบร่วมระหว่างความดันและความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (PV) และพจน์ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (TV) ดังนั้นจึงนำวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) มาใช้ เพื่อทดสอบหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 และนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้นมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduced Model) ต่อไป

$$\text{Sulfolane Content } (y_4) = -1.5 + 0.1745P + 0.001T - 0.1V + 0.000978P^2 + 0.000106T^2 + 0.0021V^2 - 0.001208PT + 0.00043PV + 0.00005TV \quad (5.7)$$

Response Surface Regression: Sulfolane content versus Pressure, Temp, Agitator						
Backward Elimination of Terms						
α to remove = 0.05						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	4	6.09101	1.52275	46.25	0.000	
Linear	2	0.29469	0.14735	4.48	0.041	
Pressure	1	0.25298	0.25298	7.68	0.020	
Temp	1	0.27540	0.27540	8.36	0.016	
Square	1	0.16972	0.16972	5.15	0.047	
Pressure*Pressure	1	0.16972	0.16972	5.15	0.047	
2-Way Interaction	1	0.52563	0.52563	15.97	0.003	
Pressure*Temp	1	0.52563	0.52563	15.97	0.003	
Error	10	0.32923	0.03292			
Lack-of-Fit	8	0.30743	0.03843	3.53	0.240	
Pure Error	2	0.02180	0.01090			
Total	14	6.42024				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
	0.181448	94.87%	92.82%	79.91%		
Coded Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-6.02		2.65	-2.28	0.046	
Pressure	0.1837		0.0663	2.77	0.020	240.14
Temp	0.0404		0.0140	2.89	0.016	19.00
Pressure*Pressure	0.000948		0.000417	2.27	0.047	78.14
Pressure*Temp	-0.001208		0.000302	-4.00	0.003	181.00
Regression Equation in Uncoded Units						
Sulfolane content = -6.02 + 0.1837 Pressure + 0.0404 Temp						
+ 0.000948 Pressure*Pressure - 0.001208 Pressure*Temp						

รูปที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากรูปที่ 5.23 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์แบบลดตัวแปรอิสระ สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 แสดงให้เห็นว่าพจน์ที่มีนัยสำคัญต่อที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความดัน (P) อุณหภูมิ (T) พจน์กำลังสองของ

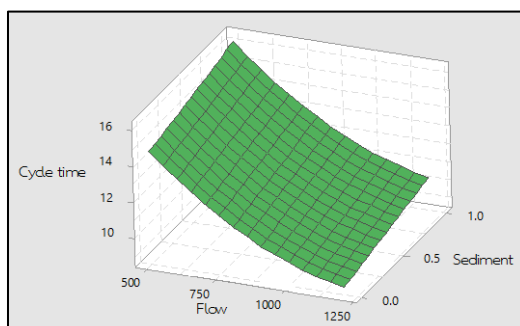
ความดัน (P^2) และผลกระทบร่วมระหว่างความดันและอุณหภูมิ (PT) ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 5.8 โดยที่ มีค่า P-Value ของ Lack-of-Fit = 0.24 มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่า สมการที่ 5.8 ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นกำลังสอง มีความเหมาะสมแล้ว จากผลลัพธ์ $R^2 = 94.87\%$ แสดงว่าสมการที่ 5.8 สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี มีความแม่นยำในการทำนายค่าตัวแปรตอบสนอง จึงถือว่าสมการความสัมพันธ์นี้มีความเหมาะสม สำหรับค่า VIF ของ P, T, P^2 และ PT มีค่ามากกว่า 10 หมายความว่า ทั้งสี่พจน์มีความสัมพันธ์กันเอง เนื่องจาก P และ T มีความสัมพันธ์ตามสมการ Antoine

$$\text{Sulfolane Content } (y_4) = -6.02 + 0.1837P + 0.0404T + 0.000948P^2 - 0.001208PT \quad (5.8)$$

5.7 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plots)

5.7.1 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของรอบเวลาและปัจจัยในขั้นตอนที่ 1

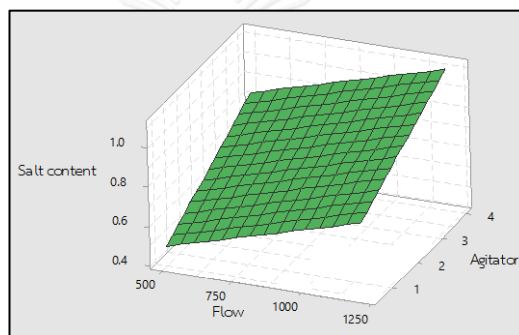
จากสมการความสัมพันธ์ของรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 (y_1) จะเห็นได้ว่า จะเห็นได้ว่าไม่มีพจน์ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย แต่พจน์ผลกระทบหลักของอัตราการไหล (Flow: F) พจน์ผลกระทบหลักของช่วงเวลารอกการตกตะกอน (Sediment: S) และพจน์กำลังสองของอัตราการไหล (F^2) มีนัยสำคัญ จากรูปที่ 5.24 อธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะทำให้รอบเวลาดลดลงทั้งในช่วงเวลารอกการตกตะกอนต่ำและสูง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้สารไหลเร็วขึ้น จึงทำให้รอบเวลาดลดลง การลดลงของช่วงเวลารอกการตกตะกอนจะทำให้รอบเวลาดลดลงทั้งที่อัตราการไหลต่ำและสูง ซึ่งการลดลงนั้นจะลดลงอย่างคงที่ เนื่องจากการลดช่วงเวลารอกการตกตะกอนคือการลดระยะเวลาของรอบเวลา



รูปที่ 5.24 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและช่วงเวลารอกการตกตะกอนต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1

5.7.2 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของเกลือและปัจจัยในขั้นตอนที่ 1

จากสมการความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของเกลือในขั้นตอนที่ 1 (y_2) จะเห็นได้ว่าไม่มีพจน์ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย แต่พจน์ผลกระทบหลักของอัตราการไหล (Flow: F) และพจน์ผลกระทบหลักของความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (Agitator: L) มีนัยสำคัญ จากรูปที่ 5.25 เมื่อพิจารณาการลดลงของอัตราการไหลจะทำให้ความเข้มข้นของเกลือในส่วนของสารที่ล้นออกมาลดลง เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำนั้น เกลือจะฟุ้งกระจายติดไปกับส่วนที่ล้นออกน้อยกว่าที่อัตราการไหลสูง และเมื่อพิจารณาการลดลงของความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนจะทำให้ความเข้มข้นของเกลือลดลง เช่นเดียวกัน เนื่องจากที่ความเร็วใบพัดต่ำนั้น เกลือจะฟุ้งกระจายติดไปกับส่วนที่ล้นออกน้อยกว่าที่ความเร็วใบพัดสูง

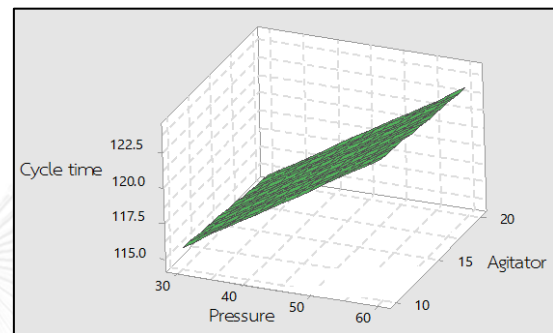
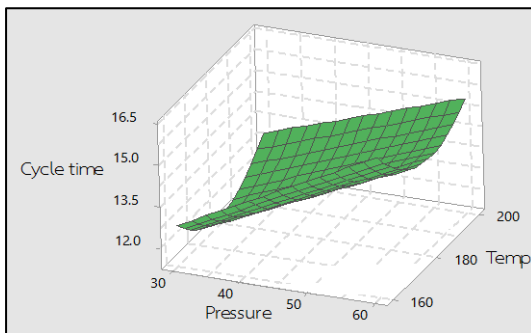


รูปที่ 5.25 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนต่อค่าความเข้มข้นของเกลือ

5.7.3 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของรอบเวลาและปัจจัยในขั้นตอนที่ 3

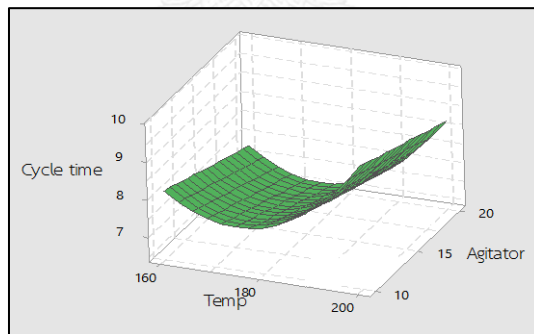
จากสมการความสัมพันธ์ของรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 (y_3) จะเห็นได้ว่าพจน์ผลกระทบหลักของความดัน (Pressure: P) พจน์ผลกระทบหลักของอุณหภูมิ (Temperature: T) พจน์ผลกระทบหลักของความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้ง (Agitator: V) พจน์กำลังสองของอุณหภูมิ (T^2) และพจน์ผลกระทบร่วมระหว่างความดันและอุณหภูมิ (TP) มีนัยสำคัญ จากรูปที่ 5.26 อธิบายได้ว่าการลดลงของความดันที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้รอบเวลาดลดลงมากกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ ต้องใช้เวลาในการกลั่นสารซัลโฟลานออกจากเกลือ จึงทำให้ใช้รอบเวลานาน ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำจึงเห็นการลดลงของรอบเวลาอย่างชัดเจน และจากรูปที่ 5.27 การเพิ่มขึ้นของความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้งจะทำให้รอบเวลาดลดลง เนื่องจากสารในเครื่องกั่นแห้งมีลักษณะเป็นของหนืด ดังนั้นการเพิ่มความเร็วใบพัดจะทำให้สารระเหยได้เร็วยิ่งขึ้น จึงทำให้รอบเวลาดลดลง และ

การลดลงของความดันจะทำให้รอบเวลาดลดลง เนื่องจากการตั้งค่าความดันต่ำทำให้เกลือฟุ้งกระจายไม่รวมตัวกัน จึงทำให้สารระเหยเร็วขึ้น ดังนั้นรอบเวลาจึงลดลง สำหรับรูปที่ 5.28 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกับรอบเวลาที่มีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยช่วงกลางของอุณหภูมิจะทำให้รอบเวลาดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับช่วงต่ำและสูง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิช่วงต่ำไปยังช่วงกลางจะทำให้สารระเหยเร็วขึ้น รอบเวลาจึงลดลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจากช่วงกลางไปยังช่วงสูงจะทำให้สารที่ระเหยขึ้นไปนั้นเกิดการอิมิตัวและควบแน่นตกลงกลับมาใหม่อีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้รอบเวลากลับมาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.27 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3

รูปที่ 5.26 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3

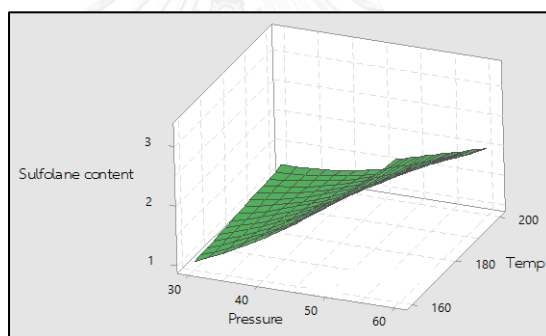


รูปที่ 5.28 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3

5.7.4 ผลการวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานและปัจจัยในขั้นตอนที่ 3

จากสมการความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานในขั้นตอนที่ 3 (y_4) จะเห็นว่าพจน์ผลกระทบหลักของความดัน (Pressure: P) พจน์ผลกระทบหลักของอุณหภูมิ (Temperature: T) พจน์กำลังสองของความดัน (P^2) และพจน์ผลกระทบร่วมระหว่างความดันและอุณหภูมิ (PT) มี

นัยสำคัญ จากรูปที่ 5.29 อธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟลันไม่เปลี่ยนแปลงมากนักที่ความดันต่ำ แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟลันลดลงที่ความดันสูง เนื่องจากที่ความดันสูง อุณหภูมิที่เหมาะสมตามสมการ Antoine คือ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นการตั้งค่าอุณหภูมิต่ำกว่า $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงทำให้สารซัลโฟลันไม่ระเหยไป ดังนั้นจึงเห็นความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันที่อุณหภูมิต่ำและสูงอย่างชัดเจน แต่ที่ความดันต่ำนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมตามสมการ Antoine คือ $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ก็เพียงพอที่จะทำให้สารซัลโฟลันระเหยแล้ว ดังนั้นถ้าหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงไม่ทำให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟลันเปลี่ยนแปลงมากนัก และการที่ความดันลดลงจะทำให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟลันลดลงแบบเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากช่วงต่ำจนถึงช่วงกลางของความดัน สามารถใช้อุณหภูมิ $160\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อทำการกลั่นได้อย่างเหมาะสม จึงทำให้ค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันต่ำ แต่ช่วงกลางจนถึงช่วงสูงของความดันนั้น ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการกลั่น ไม่เช่นนั้นแล้วจะกลั่นสารไม่ออก ดังนั้นค่าความเข้มข้นของเกลือจึงสูงขึ้น



รูปที่ 5.29 กราฟพื้นผิวดตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิ ต่อค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน

5.8 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุและการกำหนดแนวทางในการปรับปรุง

ในขั้นตอนนี้ได้ผู้วิจัยนำปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองทั้ง 8 ปัจจัย ดังมีรายละเอียดบทที่ 4 มาทำการปรับปรุง โดยนำปัจจัยประเภทที่สามารถทำการปรับปรุงได้ทันทีในขั้นตอนที่ 3 ทั้งสองปัจจัยนั้นมาทำการแก้ไขก่อนเริ่มทำการทดลอง แล้วจึงนำปัจจัยที่เหลืออีก 6 ปัจจัย มาทำการทดลอง เพื่อพิสูจน์หาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยแบ่งเป็นขั้นตอนที่ 1 จำนวน 3 ปัจจัย และขั้นตอนที่ 3 จำนวน 3 ปัจจัย ผู้วิจัยได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวดตอบสนอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่า สำหรับกรณีที่มี 3 ปัจจัย

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้แสดงผลการวิเคราะห์สมการสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ซึ่งใช้ Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) ในการเลือกพจน์ที่มีนัยสำคัญ สมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 80% ซึ่งมีความหมายว่า สมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการ สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี มีความแม่นยำในการทำนายค่าตัวแปรตอบสนอง ต่อจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย โดยใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plots) เพื่ออธิบายทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนอง

ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะนำสมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการมาวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น



บทที่ 6

การปรับปรุงกระบวนการ

หลังจากได้ทำการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยต่างๆ ที่มีนัยสำคัญแล้ว ในบทนี้ผู้วิจัยจะนำสมการความสัมพันธ์มาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนอง ซึ่งคือรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 (y_1) ค่าความเข้มข้นของเกลือ (y_2) รอบเวลาในขั้นตอนที่ 3 (y_3) และค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน (y_4) น้อยที่สุด

6.1 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม

จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์และทดสอบความถูกต้องข้างต้นแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งค่าเครื่องจักรด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป (MINITAB) โดยที่การหาค่าที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าต่างดังนี้

1. ตัวแปรตอบสนอง (Response)

การกำหนดตัวแปรตอบสนอง คือ การเลือกตัวแปรตอบสนองที่จะนำมาใช้วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

2. วัตถุประสงค์ (Goal)

การกำหนดวัตถุประสงค์มี 3 ประเภท คือ การกำหนดให้ผลตอบสนองมีค่าเหลือน้อยที่สุด (Minimize) การกำหนดให้ผลตอบสนองเท่ากับค่าเป้าหมาย (Target) และการกำหนดให้ผลตอบสนองมีค่ามากที่สุด (Maximum)

3. น้ำหนัก (Weight)

การกำหนดน้ำหนักให้ผลตอบแต่ละตัว โดยแต่ละผลตอบสามารถกำหนดน้ำหนักได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 เพื่อที่จะลดหรือเพิ่มความสำคัญต่อเป้าหมาย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การกำหนดน้ำหนักน้อยกว่า 1 (ต่ำสุด 0.1) คือ การให้ความสำคัญของเป้าหมาย (Target) น้อยกว่าขอบเขต (Bounds)

3.2 การกำหนดน้ำหนักเท่ากับ 1 คือ การให้ความสำคัญของเป้าหมายเท่ากับขอบเขต

3.3 การกำหนดน้ำหนักมากกว่า 1 (สูงสุด 10) คือ การให้ความสำคัญของเป้าหมายมากกว่าขอบเขต

4. ระดับความสำคัญ (Importance)

การกำหนดระดับความสำคัญ (Importance) ของแต่ละผลตอบ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยที่ระดับความสำคัญของแต่ละผลตอบจะต้องกำหนดให้อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ถ้าผลตอบทุกตัวมีความสำคัญเท่ากัน ใช้ค่ากำหนดคือ 1 สำหรับผลตอบแต่ละตัว หากมีผลตอบตัวใดที่มีความสำคัญมากกว่าตัวอื่น สามารถกำหนดให้แต่ละตัวมีค่าที่แตกต่างกันได้ โดยค่าที่มากขึ้นหมายถึงมีความสำคัญมาก ค่าที่น้อยลงหมายถึงมีความสำคัญน้อย

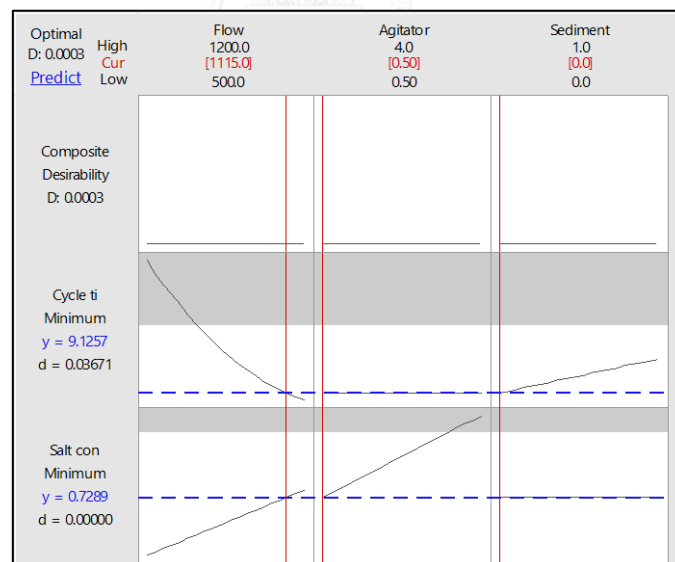
6.1.1 ผลการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 1

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของตัวแปรในขั้นตอนที่ 1 ได้แก่ อัตราการไหล ความเร็วใบพัดของกังตักตะกอน และช่วงเวลารอการตะกอน เพื่อให้ได้รอบเวลาและค่าความเข้มข้นของเกลื่อน้อยที่สุด ซึ่งกำหนดค่าวัตถุประสงค์ (Goal) ค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าความสำคัญ (Importance) ของแต่ละตัวแปรตอบสนองในโปรแกรม MINITAB ดังนี้

1. รอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 ได้กำหนดรายละเอียดการตั้งค่าในโปรแกรมดังต่อไปนี้
 - วัตถุประสงค์แบบ Minimize เนื่องจากต้องการให้รอบเวลาลดลง
 - เป้าหมาย = 8 ชั่วโมง เพื่อให้เท่ากับรอบเวลาการผลิต ซึ่งจะทำการกระบวนการดำเนินได้ต่อเนื่อง โดยที่ไม่เกิดการรอคอย
 - ขอบบน = 12 ชั่วโมง เนื่องจากรอบเวลาโดยเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 12 ชั่วโมง
 - ค่าน้ำหนัก = 10 เนื่องจากให้ความสำคัญกับเป้าหมาย 8 ชั่วโมงมากกว่าขอบเขต 12 ชั่วโมง หรืออีกนัยหนึ่งคือต้องการลดรอบเวลาให้มากที่สุด
 - ค่าความสำคัญ = 1 เนื่องจากให้ความสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง y_1 และ y_2 เท่ากัน
2. ค่าความเข้มข้นของเกลื่อน ได้กำหนดรายละเอียดการตั้งค่าในโปรแกรมดังต่อไปนี้
 - วัตถุประสงค์แบบ Minimize เนื่องจากต้องการให้ความเข้มข้นของเกลื่อนลดลง
 - เป้าหมาย = 0% เนื่องจากความเข้มข้นของเกลื่อนเหลือน้อยมากเท่าไร ยิ่งทำให้สารซัลโฟลานที่จะนำไปใช้ในรอบการผลิตถัดไปบริสุทธิ์มากขึ้นเท่านั้น
 - ขอบบน = 1% เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้นของเกลื่อนที่มากที่สุดที่โรงงานยอมรับได้

- น้ำหนัก = 10 เนื่องจากให้ความสำคัญกับเป้าหมาย 0% มากกว่าขอบเขต 1% หรืออีกนัยหนึ่งคือ ยิ่งความเข้มข้นของเกลือเหลือน้อยเท่าไร ยิ่งทำให้สารซัลโฟลานที่กลั่นได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นเท่านั้น
- ความสำเร็จ = 1 เนื่องจากให้ความสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง y_1 และ y_2 เท่ากัน

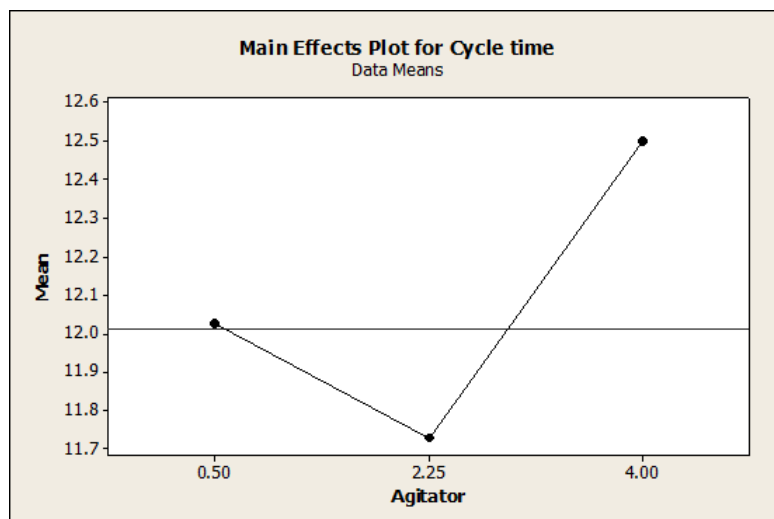
เมื่อกำหนดเป้าหมายแต่ละแบบให้แก่ผลตอบแต่ละตัว รวมถึงกำหนดน้ำหนักและความสำคัญครบแล้ว จะใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรม เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการตั้งค่าตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งหาได้จากสมการความสัมพันธ์ y_1 และ y_2 พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนที่ 1 คือ อัตราการไหลเท่ากับ 1,115 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนเท่ากับ 0.5 รอบ/นาที และช่วงเวลารอกการตกตะกอนเท่ากับ 0 ชั่วโมง ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งจะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 9.1257 ชั่วโมงและค่าความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 0.7289% โดยที่ค่า Desirability = 0.0003 ซึ่งมีค่าไม่เข้าใกล้ 1 เนื่องจากรอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอนที่ได้จากการทำ Response Optimizer ห่างจากเป้าหมายประมาณ 1 ชั่วโมง (เป้าหมาย = 8 ชั่วโมง) และความเข้มข้นของเกลือที่ได้จากการทำ Response Optimizer ห่างจาก Target 0.7289% (เป้าหมาย = 0%)



รูปที่ 6.1 รูปแสดงสถานะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 1

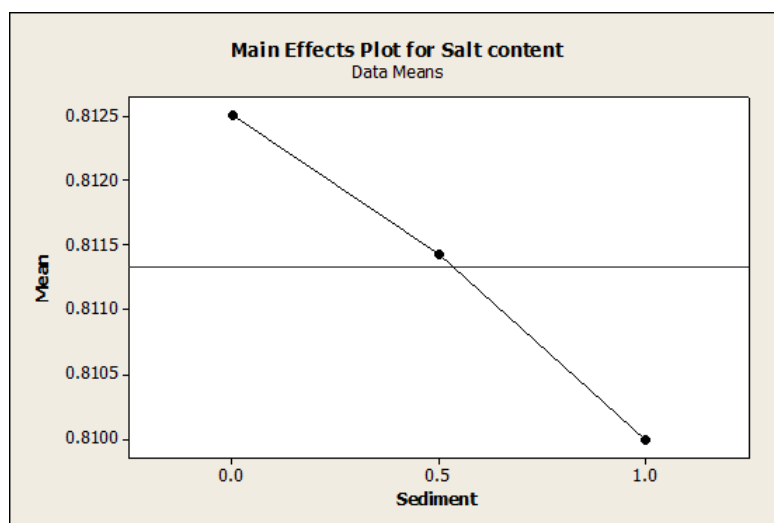
นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในสมการที่ 5.2 ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนไม่มีนัยสำคัญต่อรอบเวลาขั้นตอนที่ 1 และในสมการที่ 5.4 ช่วงเวลารอกการตกตะกอนไม่มีนัยสำคัญต่อความเข้มข้นของเกลือ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนกับรอบเวลาของ

ขั้นตอนที่ 1 และความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลารอการตกตะกอนกับความเข้มข้นของเกลือ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ โดยใช้สมการเต็มรูปแบบ (Full Model) สมการที่ 5.1 และ 5.3 ตามลำดับ



รูปที่ 6.2 ผลกระทบหลักของความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนที่มีผลต่อรอบเวลาขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนกับรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 นั้นแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ จากระดับต่ำของปัจจัย (-1) ไปยังระดับกลางของปัจจัย (0) มีความสัมพันธ์กับรอบเวลาแบบลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วในการคนสารจะทำให้สารล้นออกจากถังตกตะกอนเร็วขึ้น เมื่อตรวจดูความเข้มข้นของเกลือจากช่องตรวจใส (Sight Glass) พบว่าสารที่ล้นออกมามีความขุ่นน้อยและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการคนสารจากระดับกลางของปัจจัย (0) ไปยังระดับสูงของปัจจัย (+1) พบว่ามีความสัมพันธ์กับรอบเวลาแบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วในการคนสารจะทำให้เกลือที่อยู่ภายในถังตกตะกอนฟุ้งมาก ดังนั้นสารที่ล้นออกจากถังตกตะกอนจึงมีความเข้มข้นของเกลือที่สูงขึ้น เมื่อตรวจดูความเข้มข้นของเกลือจากช่องตรวจใส จะเห็นได้ว่าสารที่ล้นออกมามีความขุ่นที่มากขึ้นจนไม่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงต้องหยุดการปฏิบัติงานชั่วคราวในบางครั้ง ซึ่งมีผลทำให้รอบเวลาของขั้นตอนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าความเข้มข้นเกลือที่น้อยที่สุดกับมากที่สุด แตกต่างกันเพียงแค่ 7.7% เท่านั้น จึงทำให้ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนไม่มีนัยสำคัญต่อรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 6.3 ผลกระทบหลักของช่วงเวลารอกการตกตะกอนที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของเกลือ

จากรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลารอกการตกตะกอนกับความเข้มข้นของเกลือมีทิศทางตรงข้ามกัน ถ้าหากลดช่วงเวลารอกการตกตะกอนจะทำให้ความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของเกลือเมื่อช่วงเวลารอกการตกตะกอนเปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก โดยการลดช่วงเวลารอกการตกตะกอนลงจาก 1 ชั่วโมงเป็น 0 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นของเกลือลดลงเพียง 0.309% ดังนั้นช่วงเวลารอกการตกตะกอนจึงไม่มีนัยสำคัญต่อความเข้มข้นของเกลือ จึงสรุปได้ว่าไม่จำเป็นต้องรอกการตกตะกอน เพราะทำให้เสียเวลาโดยประโยชน์ ทั้งที่การรอกการตกตะกอนนั้นแทบไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มข้นของเกลือเลย ซึ่งผู้วิจัยได้คุยกับทางทีมงานเพื่อทำความเข้าใจที่ไม่จำเป็นต้องรอกการตกตะกอนก่อนทำการทดลองยืนยันผล

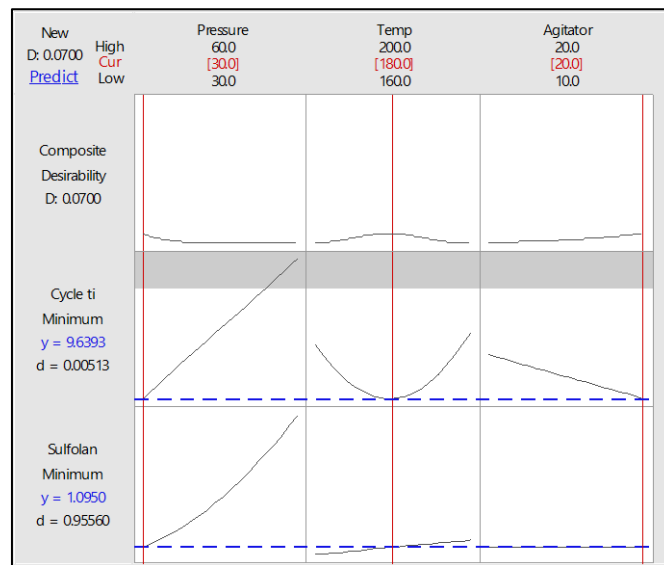
6.1.2 ผลการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 3

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของตัวแปรในขั้นตอนที่ 3 ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง เพื่อให้ได้รอบเวลาและค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานน้อยที่สุด ซึ่งกำหนดค่าวัตถุประสงค์ (Goal) ค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าความสำคัญ (Importance) ของแต่ละตัวแปรตอบสนองในโปรแกรม MINITAB ดังนี้

1. รอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 ได้กำหนดรายละเอียดการตั้งค่าในโปรแกรมดังต่อไปนี้
 - วัตถุประสงค์แบบ Minimize เนื่องจากต้องการให้รอบเวลาดลดลง
 - เป้าหมาย = 8 ชั่วโมง เพื่อให้เท่ากับรอบเวลาการผลิต ซึ่งจะทำให้กระบวนการดำเนินได้ต่อเนื่อง โดยที่ไม่เกิดการรอกคอย

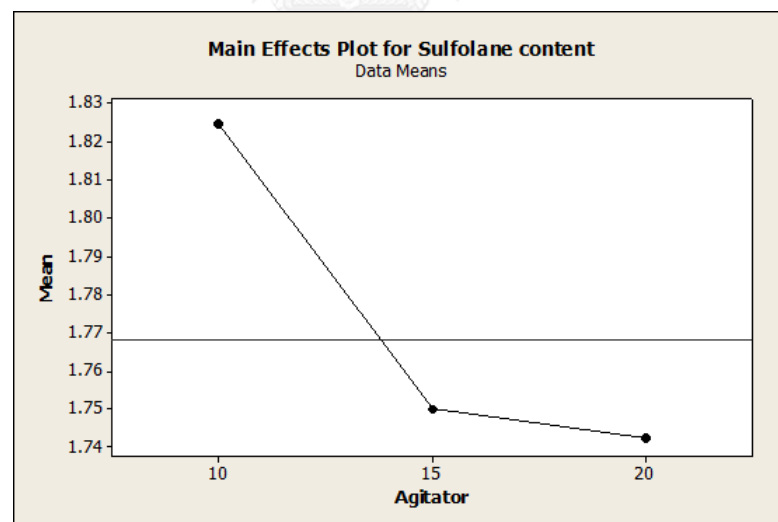
- ขอบบน = 12 ชั่วโมง เนื่องจากรอบเวลาโดยเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 3 เท่ากับ 12 ชั่วโมง
 - ค่าน้ำหนัก = 10 เนื่องจากให้ความสำคัญกับเป้าหมาย 8 ชั่วโมงมากกว่าขอบเขต 12 ชั่วโมง หรืออีกนัยหนึ่งคือต้องการลดรอบเวลาให้มากที่สุด
 - ค่าความสำคัญ = 1 เนื่องจากให้ความสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง y_3 และ y_4 เท่ากัน
2. ค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน ได้กำหนดรายละเอียดการตั้งค่าในโปรแกรมดังต่อไปนี้
- วัตถุประสงค์แบบ Minimize เนื่องจากต้องการให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน ลดลง
 - เป้าหมาย = 0% เนื่องจากความเข้มข้นของสารซัลโฟลานเหลือน้อย แสดงว่าสามารถกลั่นสารซัลโฟลานออกไปจากเกลือได้มากยิ่งขึ้น
 - ขอบบน = 3% เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานที่มากที่สุดที่โรงงานยอมรับได้
 - น้ำหนัก = 10 เนื่องจากให้ความสำคัญกับเป้าหมาย 0% มากกว่าขอบเขต 3% หรืออีกนัยหนึ่งคือ ยิ่งความเข้มข้นของสารซัลโฟลานเหลือน้อยเท่าไร แสดงว่าสามารถกลั่นสารซัลโฟลานออกไปได้มากยิ่งขึ้น
 - ความสำคัญ = 1 เนื่องจากให้ความสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง y_3 และ y_4 เท่ากัน

เมื่อกำหนดเป้าหมายแต่ละแบบให้แก่ผลตอบแต่ละตัว รวมถึงกำหนดน้ำหนักและความสำคัญครบแล้ว จะใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรม เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการตั้งค่าตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งหาได้จากสมการความสัมพันธ์ y_3 และ y_4 พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนที่ 3 คือ ความดันเท่ากับ 30 mbar อุณหภูมิเท่ากับ 180 °C และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งเท่ากับ 20 รอบ/นาที ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งจะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 เท่ากับ 9.6393 ชั่วโมงและค่าความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 1.095% โดยที่ค่า Desirability = 0.07 ซึ่งมีค่าไม่เข้าใกล้ 1 เนื่องจากรอบเวลาของขั้นตอนการกลั่นแห้งที่ได้จากการทำ Response Optimizer ห่างจากเป้าหมาย ประมาณ 1 ชั่วโมงครึ่ง (เป้าหมาย = 8 ชั่วโมง) และความเข้มข้นของสารซัลโฟลานที่ได้จากการทำ Response Optimizer ห่างจากเป้าหมาย 1.095% (เป้าหมาย = 0%)



รูปที่ 6.4 รูปแสดงสถานะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 3

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในสมการที่ 5.8 นั้น ความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้งไม่มีนัยสำคัญต่อรอบเวลาขั้นตอนที่ 3 ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.5 โดยใช้สมการเต็มรูปแบบ (Full Model) สมการที่ 5.7



รูปที่ 6.5 ผลกระทบหลักของความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้งที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน

จากรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดของเครื่องกั่นแห้งแนวตั้งกับความเข้มข้นของสารซัลโฟลานนั้นแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ จากระดับต่ำของปัจจัย (-1) ไปยังระดับกลางของปัจจัย (0) มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารซัลโฟลานแบบลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก

การเพิ่มความเร็วในการคนสารจะทำให้เกลือไม่เหน็ด ดังนั้นสารซัลโฟลานจึงระเหยได้ง่ายขึ้น ความเข้มข้นของสารซัลโฟลานในเกลือจึงลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการคนสารจากระดับกลางของปัจจัย (0) ไปยังระดับสูงของปัจจัย (+1) พบว่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานจากระดับกลางไปยังระดับสูง จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันเพียงแค่ 0.574% เท่านั้น จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนความเร็วใบพัดจากระดับกลางไปยังระดับสูงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของซัลโฟลานเมื่อความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งเปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก โดยการลดความเร็วใบพัดลงจากเดิม 20 รอบ/นาที เป็น 10 รอบ/นาที ทำให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟลานเพิ่มขึ้นเพียง 4.597% ดังนั้นความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งจึงไม่มีนัยสำคัญต่อความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน

6.2 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการได้วิเคราะห์หาค่าของปัจจัยปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม และจากผลการวิเคราะห์ Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB พบว่าในขั้นตอนที่ 1 สภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราการไหลเท่ากับ 1,115 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนเท่ากับ 0.5 รอบ/นาที และช่วงเวลารอการตกตะกอนเท่ากับ 0 ชั่วโมง ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งจะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 9.1257 ชั่วโมงและค่าความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 0.7289% และในขั้นตอนที่ 3 พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ความดันเท่ากับ 30 mbar อุณหภูมิเท่ากับ 180 °C และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งเท่ากับ 20 รอบ/นาที ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งจะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 เท่ากับ 9.6393 ชั่วโมงและค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานเท่ากับ 1.095% สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวจะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 น้อยที่สุด พร้อมทั้งค่าความเข้มข้นของเกลือและค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานไม่เกินค่าที่กำหนด ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะทำการทดสอบเพื่อยืนยันผล

บทที่ 7

การยืนยันผลและการควบคุมกระบวนการ

ในบทที่ผ่านมาได้นำปัจจัยที่มีนัยสำคัญไปทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องจักร ผลจากการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมเป็นเพียงการประเมินค่าจากโปรแกรม MINITAB เท่านั้น เพื่อความมั่นใจว่าปัจจัยปรับตั้งเครื่องจักรนั้นสามารถใช้งานได้จริง จึงต้องทำการทดสอบและยืนยันผลอีกครั้ง รวมถึงจัดทำแผนควบคุมและวิธีการปฏิบัติงานใหม่ในส่วนที่ได้มีการปรับปรุง

7.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลสมการความสัมพันธ์

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นทั้ง 4 สมการ ได้แก่ สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาขั้นตอนที่ 1 (y_1) สมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นเกลือ (y_2) สมการความสัมพันธ์สำหรับรอบเวลาขั้นตอนที่ 3 (y_3) และสมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลาน (y_4) ว่าสามารถนำไปใช้ในการทำนายได้อย่างน่าเชื่อถือหรือไม่ จึงต้องทำการทดลองยืนยันผล โดยจะทำการยืนยันผลในขั้นตอนที่ 1 ก่อน เพื่อนำสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 1 ไปใช้ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนถัดไป จากนั้นจึงทำการยืนยันผลในขั้นตอนที่ 3 การยืนยันผลการทดลองของแต่ละขั้นตอนจะทำการทดลอง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมซ้ำจำนวน 3 ครั้งการทดลอง แล้วจึงทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการทำนายของสมการความสัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าอคติ (Bias) ในขั้นตอนที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าอคติของรอบเวลาเท่ากับ 3.88% และค่าอคติของค่าความเข้มข้นเกลือเท่ากับ 3.97% สำหรับขั้นตอนที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าอคติของรอบเวลาเท่ากับ 0.86% และค่าอคติของค่าความเข้มข้นสารซัลโฟลานเท่ากับ 4.38% พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือไม่ควรเกิน 5% [27] สรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมทั้งสองสภาวะของทั้งสองขั้นตอนที่ได้จากสมการความสัมพันธ์มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของ
ขั้นตอนที่ 1

เงื่อนไขที่ เหมาะสม	รอบเวลาขั้นตอนที่ 1 (y_1 : ชม./รอบการผลิต)		ค่าอคติ ² (%Bias)	ความเข้มข้นของเกลือ (y_2 : %)		ค่าอคติ ² (%Bias)
	ค่าที่ได้จาก การทดลอง ¹	ค่าที่ได้จาก สมการ		ค่าที่ได้จาก การทดลอง ¹	ค่าที่ได้จาก สมการ	
อัตราการใช้ (1,115 กก./ชม.)	9.48	9.1257	3.88	0.70	0.7289	3.97
ความเร็วใบพัด (0.5 รอบ/นาที)						
ช่วงเวลารอคอยก่อน (0 ชม.)						

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของ
ขั้นตอนที่ 3

เงื่อนไขที่เหมาะสม	รอบเวลาขั้นตอน ที่ 3 (y_3 : ชม./รอบการผลิต)		ค่าอคติ ² (%Bias)	ความเข้มข้นของ สารซัลโฟลัน (y_4 : %)		ค่าอคติ ² (%Bias)
	ค่าที่ได้จาก การทดลอง ¹	ค่าที่ได้จาก สมการ		ค่าที่ได้จาก การทดลอง ¹	ค่าที่ได้จาก สมการ	
ความดัน (30 mbar)	9.56	9.6393	0.86	1.14	1.095	4.38
อุณหภูมิ (180 °C)						
ความเร็วใบพัด (20 รอบ/นาที)						

¹ค่าที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยจำนวน 3 ครั้ง

²Bias คำนวณได้จาก $[|ค่าที่ได้จากสมการ - ค่าที่ได้จากการทดลอง| / ค่าที่ได้จากสมการ] \times 100$

7.2 การออกแบบการควบคุมกระบวนการ

7.2.1 การกำหนดวิธีการปฏิบัติงานใหม่ (Work Instruction)

จากการปรับปรุงกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงงานวิจัยเป็น
2 ส่วนหลักๆ คือ ปรับปรุงปัจจัยประเภทที่สามารถทำการปรับปรุงได้ในทันที และปรับปรุงปัจจัย

ประเภทที่ต้องนำมาทำการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม ภายหลังจากปรับปรุงผู้วิจัยได้นำรายละเอียดของการปรับปรุงนั้นมาจัดทำวิธีการปฏิบัติงานใหม่ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. วิธีการปฏิบัติงานสำหรับปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้ทันที

ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการปรับปรุงปัจจัยประเภทที่สามารถทำการปรับปรุงได้ทันทีในขั้นตอนที่ 3 ทั้งสองปัจจัย ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน

วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลานแต่เดิมนั้นจะทำการตรวจสอบด้วยวิธีการกรองแบบลดความดัน ซึ่งวิธีการตรวจสอบดังกล่าวให้ค่าที่ไม่น่าเชื่อถือ แต่ถ้าหากลงทุนซื้อเครื่องมือที่น่าเชื่อถือนั้นจะต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ผู้วิจัยและทีมงานปรับปรุงได้ระดมความคิดเพื่อทำการปรับปรุงวิธีการตรวจสอบ โดยมีผลสรุปว่าจะส่งสารตัวอย่างไปตรวจสอบที่ห้องทดลองนอกโรงงาน ใช้การตรวจสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์เถ้าโดยการหาเถ้าเปียก (Wet Ashing) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าและคุ้มกับค่าใช้จ่าย

2. มีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ

การปรับปรุงแก้ไขปัญหาเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ ผู้วิจัยและทีมงานปรับปรุงได้ลงความเห็นว่าจะจัดให้มีการทำความสะอาดโดยการถอดอุปกรณ์ดักจับออกมาทำความสะอาดเดือนละ 1 ครั้ง

ข. วิธีการปฏิบัติงานสำหรับปัจจัยที่ต้องนำมาทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม

หลังจากทำการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในบทที่ 6 ต่อมาจึงจัดให้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการปฏิบัติงานให้ถูกต้องเหมาะสมตรงกับที่ได้ทำการทดลองไว้ดังตารางที่ 7.3 และ ตารางที่ 7.4 โดยที่ควบคุมค่าปรับตั้งตามรายละเอียดต่อไปนี้

1. ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการตกตะกอน

อัตราการไหล	เท่ากับ 1,115	กิโลกรัม/ชั่วโมง
ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน	เท่ากับ 0.5	รอบ/นาที
ช่วงเวลารอกการตกตะกอน	เท่ากับ 0	ชั่วโมง

2. ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการกลั่นแห้ง

ความดัน	เท่ากับ 30	mbar
อุณหภูมิ	เท่ากับ 180	°C

ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง เท่ากับ 20 รอบ/นาที

ตารางที่ 7.3 วิธีการปฏิบัติงานของขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอน	กระบวนการ	ระยะเวลา	การปฏิบัติที่ควรคำนึงถึง
1	ตรวจสอบ เครื่องจักรและ อุปกรณ์ที่หน่วยการ ตกตะกอนให้พร้อม ที่จะเริ่ม กระบวนการ	10 นาที	<ul style="list-style-type: none"> เปิดหน่วยการให้ความร้อนที่ถังตกตะกอนทั้ง 3 หน่วย ตั้งค่าความเร็วใบพัดที่ถังตกตะกอน = 0.5 รอบ/นาที บันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิของถังตกตะกอนก่อนการ รับสารจากถังพัก
2	ปล่อยสาร NaCl-Sul จากถังพักมายังถัง ตกตะกอน	8 – 9 ชม.	<ul style="list-style-type: none"> ควบคุมอัตราการไหล = 1,115 กก./ชม. ควบคุมอุณหภูมิของถังตกตะกอน = 145 – 155 °C ตรวจสอบสารซัลโฟลันที่ล้นออกตรงช่องตรวจใส (Sight Glass) หยุดการปล่อยสารเมื่อหมดถังพัก
3	รับสารซัลโฟลันที่ ล้นออกมาเก็บไว้ที่ ถังเก็บน้ำล้น	-	<ul style="list-style-type: none"> ปริมาตรสูงสุดของถังเก็บน้ำล้น = 1 ลบ.ม. ความเข้มข้นของเกลือที่ถังเก็บน้ำล้นต้อง < 1%
4	เปิดหน่วยให้ความ ร้อนและปั๊ม สุญญากาศที่เครื่อง กลั่นแห้งแนวตั้ง	-	<ul style="list-style-type: none"> เปิดความเร็วมอเตอร์ของปั๊มสุญญากาศ = 80 – 90% (ความดันของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง = 30 mbar) ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง = 180 °C
5	ปั๊มเกลือที่ก้นถัง ตกตะกอนจากถัง ตกตะกอนไปยัง เครื่องกลั่นแห้ง แนวตั้ง	40 นาที	<ul style="list-style-type: none"> ระหว่างการปั๊มให้ตั้งค่าความเร็วใบพัดของถัง ตกตะกอน = 4 รอบ/นาที ความเร็วใบพัดที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง = 20 รอบ/ นาที

ตารางที่ 7.4 วิธีการปฏิบัติงานของขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอน	กระบวนการ	ระยะเวลา	การปฏิบัติที่ควรคำนึงถึง
1	ตรวจสอบเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่หน่วยการกลั่นแห้งให้พร้อมที่จะเริ่มกระบวนการ	10 นาที	<ul style="list-style-type: none"> เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งว่างเปล่า ฉีดล้างอุปกรณ์ดักจับที่เครื่องกลั่นแห้งด้วยสารซิลโฟลนก่อนเริ่มกระบวนการทุกรอบการผลิต
2	กลั่นสารซิลโฟลนที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง	8 ชม.	<ul style="list-style-type: none"> รักษาอุณหภูมิให้ = 180 °C รักษาความเร็วมอเตอร์ของปั๊มสุญญากาศ = 80 – 90% (ความดันของเครื่องกลั่นแห้ง = 30 mbar) รักษาความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง = 20 รอบ/นาที
3	หยุดการให้ความร้อนและหยุดการปั๊มสุญญากาศที่เครื่องกลั่นแห้ง	10 นาที	
4	ส่งสารซิลโฟลนที่กลั่นเสร็จจากถังรับไปยังถังเก็บสารซิลโฟลน	30 นาที	<ul style="list-style-type: none"> หลังจากการกลั่นที่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง -> ตรวจสอบความเข้มข้นของสารซิลโฟลนต้อง < 3% และตรวจสอบปริมาณน้ำในสารซิลโฟลนต้อง < 0.1% แล้วจึงส่งสารซิลโฟลนไปเก็บที่ถังเก็บสารซิลโฟลน
5	ปล่อยเกล็ดออก	40 นาที	<ul style="list-style-type: none"> ตรวจสอบหน่วยสายพานนำส่งเกล็ดให้พร้อมที่จะเริ่มกระบวนการขนย้าย ปล่อยเกล็ดออกไปเก็บที่ตู้คอนเทนเนอร์และบันทึกน้ำหนักของเกล็ด ระวังเกล็ดร้อน

ผู้วิจัยได้ปรับปรุงเอกสารวิธีการปฏิบัติงานตามวิธีการปรับปรุงที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการควบคุมปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนอง โดยปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญได้แก่ อัตราการไหล 1,115 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน 0.5 รอบ/นาที และช่วงเวลารอกการตกตะกอน 0 ชั่วโมงของขั้นตอนที่ 1 สำหรับการปรับช่วงเวลารอกการตกตะกอนให้เท่ากับ 0 ชั่วโมงจากเดิม 1 ชั่วโมงนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถปฏิบัติได้จริงหลังจากทำการทดลองยืนยันผล 3 ครั้ง เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของเกล็ดมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 6.3 บทที่ 6 อีกทั้งไม่ส่งผล

กระทบต่อเครื่องจักรและกระบวนการสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง ในขั้นตอนที่ 3 ได้มีการควบคุมปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนอง ดังนี้ ความดัน 30 mbar อุณหภูมิ 180 °C และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง 20 รอบ/นาที และควบคุมตัวแปรตอบสนองต่างๆ ดังนี้ รอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ต้องน้อยกว่า 12 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของเกลือต้องน้อยกว่า 1% และค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลานต้องน้อยกว่า 3%

7.2.2 การสร้างแผนควบคุม (Control Plan)

ผู้วิจัยได้จัดทำแผนควบคุมกระบวนการของทั้งสองขั้นตอน ในตารางที่ 7.5 แสดงแผนควบคุมขั้นตอนการตกตะกอน และขั้นตอนการกลั่นแห้งของกระบวนการนำสารซัลโฟลานกลับคืน

ในขั้นตอนการตกตะกอน (ขั้นตอนที่ 1) จะทำการควบคุมปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหล ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน และช่วงเวลารอกการตกตะกอน และควบคุมตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวแปร ได้แก่ รอบเวลา และความเข้มข้นของเกลือ และในขั้นตอนการกลั่นแห้ง (ขั้นตอนที่ 3) จะทำการควบคุมปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง และควบคุมตัวแปรตอบสนอง 2 ตัว ได้แก่ รอบเวลา และความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน

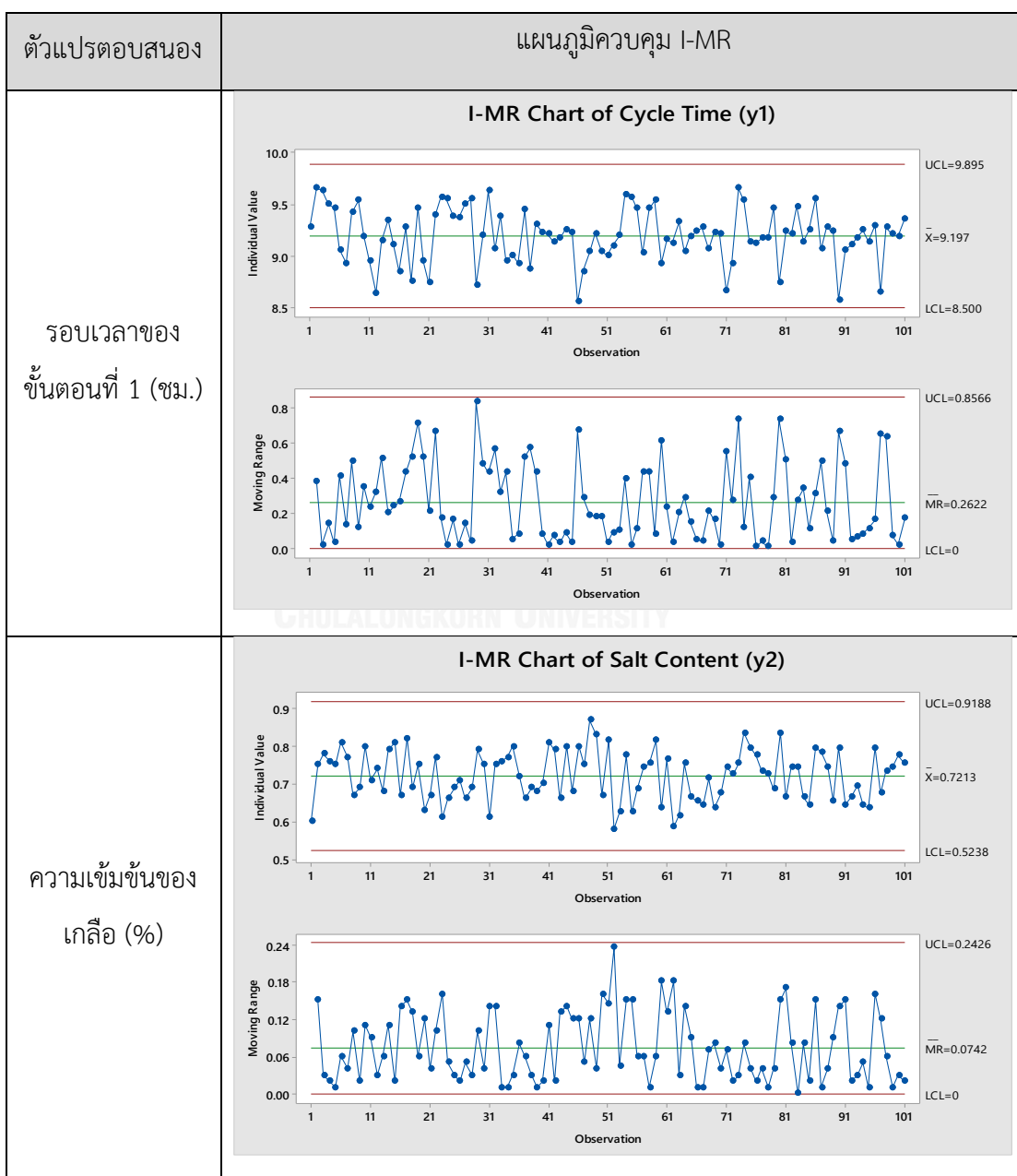
สำหรับการตรวจสอบและควบคุมปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง ปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหล ความดันและอุณหภูมิจะทำการตรวจสอบทุกชั่วโมง เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่ค่าจะคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ตั้งไว้ เนื่องจากเครื่องจักรมีอายุการใช้งานมานาน ทั้งนี้ความเป็นไปได้ที่ค่าจะคลาดเคลื่อนมีน้อยมากและความคลาดเคลื่อนนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลานมากนัก หากยังอยู่ในช่วงที่ผู้วิจัยและทีมงานกำหนด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ค่าที่ยอมรับได้ของอัตราการไหลเท่ากับ 850 – 1,200 กิโลกรัม/ชั่วโมง ซึ่งได้มาจากการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เมื่อทดลองแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 5.2 และ 5.4 รอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอน และความเข้มข้นของเกลือจะต้องอยู่ภายใน 95% Prediction Interval (PI) ขณะที่ตัวแปรที่เหลืออยู่ในความควบคุม ในการลองผิดลองถูกนั้น 95%PI ของรอบเวลาขั้นตอนการตกตะกอนอยู่ระหว่าง 7.491 – 10.759 ชั่วโมง และ 95%PI ของความเข้มข้นเกลืออยู่ระหว่าง 0.5775 – 0.8804 % สำหรับค่าที่ยอมรับได้ของความดันเท่ากับ 30 – 35 mbar และอุณหภูมิเท่ากับ 175 – 180 °C ซึ่งได้มาจากการลองผิดลองถูกเช่นเดียวกันกับค่าอัตราการไหล เมื่อทดลองแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 5.6 และ 5.8 รอบเวลาของขั้นตอนการกลั่นแห้งและความเข้มข้นของสารซัลโฟลานจะต้องอยู่ภายใน 95%PI ขณะที่ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งอยู่ในความควบคุม ในการลองผิดลองถูกนั้น 95%PI ของรอบเวลาขั้นตอนการกลั่นแห้งอยู่ระหว่าง 9.037 – 10.236 ชั่วโมง และ 95%PI ของความเข้มข้นสารซัลโฟลานอยู่ระหว่าง 0.6386 – 1.543 %

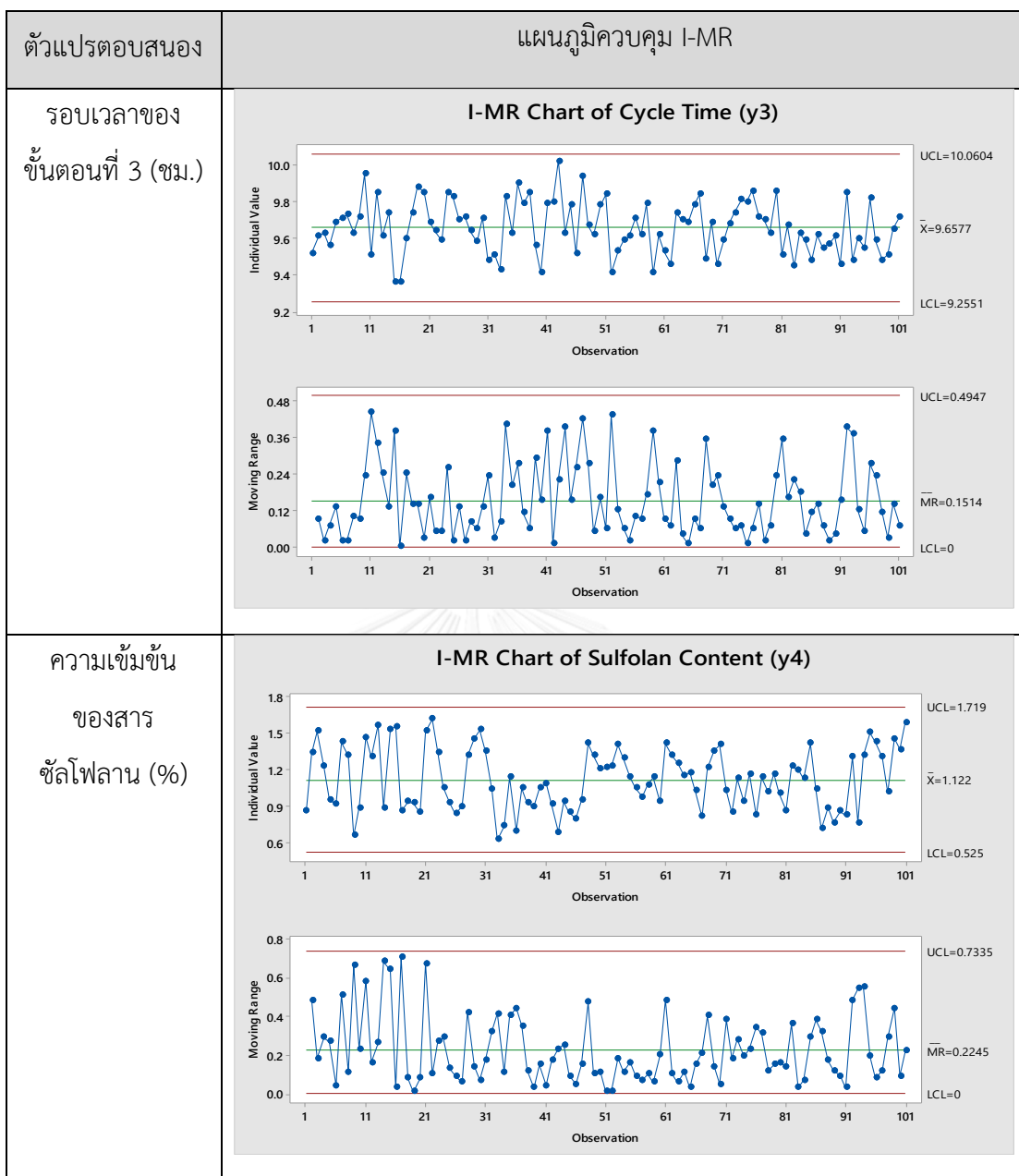
สำหรับปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองที่เหลือนั้นจะทำการตรวจสอบทุกรอบการผลิต เนื่องจากปัจจัยนำเข้าสามารถควบคุมได้ และตัวแปรตอบสนองสามารถเก็บข้อมูลได้เพียง 1 ค่าต่อรอบการผลิต

เอกสารที่ใช้ทำการตรวจสอบและควบคุมปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ค่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดเวลา มีดังนี้ แบบฟอร์มการตรวจสอบ (Check Sheet) แสดงในตารางที่ 7.6 ใช้ทำการตรวจสอบและควบคุมทั้งปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง และแผนภูมิ I-MR แสดงในรูปที่ 7.1 ใช้ทำการตรวจสอบและควบคุมตัวแปรตอบสนอง



การตรวจสอบและควบคุมด้วยแผนภูมิ I-MR เป็นหน้าที่ของแผนกควบคุมคุณภาพ (Quality Control) เพื่อให้ทราบถึงความผิดปกติของตัวแปรตอบสนองจากเดิมหรือไม่ ถ้าหากมีความผิดปกติ จะได้สามารถแก้ไขได้ทันเวลาที่ สาเหตุที่เลือกใช้แผนภูมิ I-MR เนื่องจากค่าที่ติดตามคือ รอบเวลาของ ทั้งสองขั้นตอน ความเข้มข้นของเกลือ และความเข้มข้นของสารซัลโฟลาน ซึ่งมีเพียงค่าเดียวต่อรอบ การผลิต ผู้วิจัยนำผลที่ได้จากการหาสภาวะที่เหมาะสมไปทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริงเป็น ระยะเวลา 2 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคม ถึงเดือนเมษายน ปีพ.ศ. 2560 จำนวน 101 รอบการผลิต ซึ่งเป็นผลการปฏิบัติงานจริงหลังจากการปรับปรุงทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 7.1



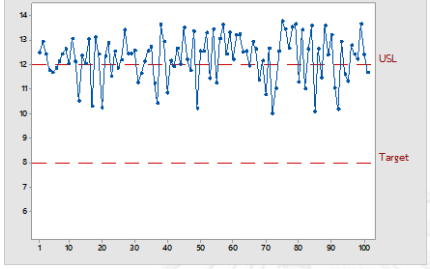
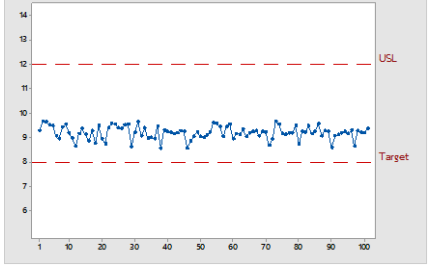
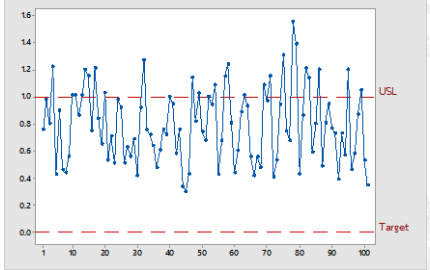
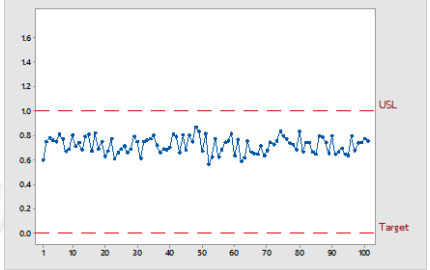
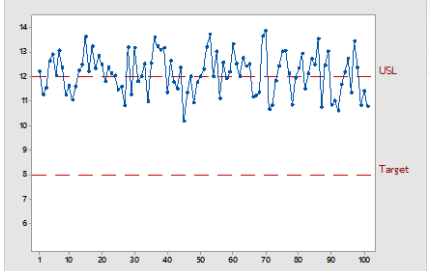
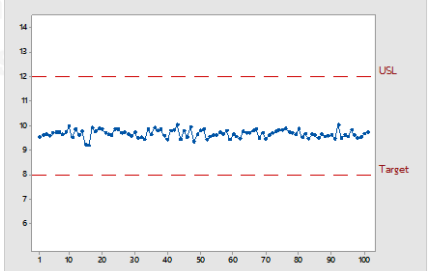
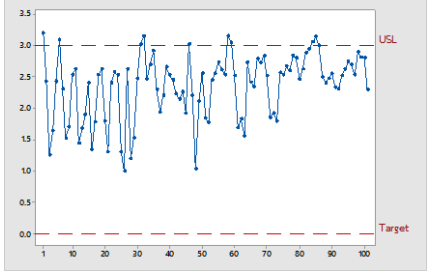
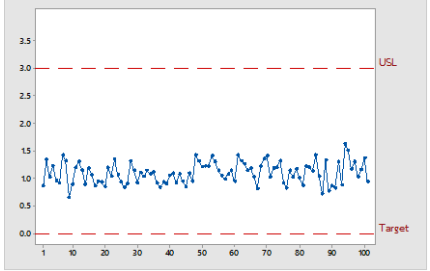


รูปที่ 7.1 แผนภูมิการควบคุม I-MR ของตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 7.1 พบว่าแผนภูมิการควบคุม I-MR ของตัวแปรตอบสนองทั้งสี่ตัวแปร ยังคงอยู่ภายใต้การควบคุม โดยรอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 9.197 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเกลือโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.72% รอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 3 เท่ากับ 9.66 ชั่วโมง และความเข้มข้นของสารซัลโฟลันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.12%

7.3 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง

ผู้วิจัยได้นำผลก่อนการปรับปรุงตั้งแต่เดือนธันวาคม ปีพ.ศ. 2558 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ ปีพ.ศ. 2559 เป็นระยะเวลา 2 - 3 เดือน มาเปรียบเทียบกับผลหลังการปรับปรุง ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการหาสภาวะที่เหมาะสมไปทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริงเป็นระยะเวลา 2 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคม ถึงเดือนเมษายน ปีพ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นผลการปฏิบัติงานจริงหลังจากการปรับปรุงทั้งหมด

ตัวแปร ตอบสนอง	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
รอบเวลาของ ขั้นตอนที่ 1 (ชม.)		
ความเข้มข้น ของเกลือ (%)		
รอบเวลาของ ขั้นตอนที่ 3 (ชม.)		
ความเข้มข้น ของสาร ซิลิโพลาน (%)		

รูปที่ 7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 7.2 พบว่าค่าเฉลี่ยและความผันแปรของตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 ตัวแปร ได้แก่ รอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 ความเข้มข้นของเกลือ รอบเวลาขั้นตอนที่ 3 และความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน มีค่าลดลงจากก่อนการปรับปรุง โดยที่รอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 1 ลดลงจาก 12.29 ชั่วโมงเหลือ 9.20 ชั่วโมง ซึ่งลดลง 25.14% ความเข้มข้นของเกลือโดยเฉลี่ยลดลงจาก 0.94% เหลือ 0.72% ซึ่งลดลง 23.40% รอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 3 ลดลงจาก 12.23 ชั่วโมงเหลือ 9.66 ชั่วโมงซึ่งลดลง 21.01% และความเข้มข้นของสารซัลโฟลันโดยเฉลี่ยลดลงจาก 2.55% เหลือ 1.12% ซึ่งลดลง 56.08% ดังแสดงในตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 เปรียบเทียบผลตอบสนองก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

ผลตอบสนอง	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	เปรียบเทียบผลการปรับปรุง (%)
รอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 1 (y_1)	12.29 ชั่วโมง/รอบการผลิต	9.20 ชั่วโมง/รอบการผลิต	25.14
ค่าความเข้มข้นของเกลือโดยเฉลี่ย (y_2)	0.94%	0.72%	23.40
รอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 3 (y_3)	12.23 ชั่วโมง/รอบการผลิต	9.66 ชั่วโมง/รอบการผลิต	21.01
ค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันโดยเฉลี่ย (y_4)	2.55%	1.12%	56.08

สาเหตุที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 ตัวแปรที่มีค่าลดลง เนื่องจากการปรับตั้งสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องจักรและมีการปรับปรุงวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันใหม่ ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของรอบเวลาขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ยังไม่ถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ 8 ชั่วโมง เนื่องจากถึงขีดความสามารถของเครื่องจักรและอาจจะมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อรอบเวลาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งไม่ได้แสดงในงานวิจัยนี้ สำหรับค่าความเข้มข้นของเกลือและความเข้มข้นของสารซัลโฟลันนั้นอยู่ในช่วงค่าที่กำหนดเป็นอย่างดีคือ 1% และ 3% ตามลำดับ

สำหรับความผันแปรที่ลดลงของทั้ง 4 ตัวแปรนั้นมีสาเหตุมาจากปรับตั้งเครื่องจักรเป็นค่าเดียวกันในแต่ละรอบการผลิต จึงทำให้ตัวแปรตอบสนองในแต่ละรอบการผลิตมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ยังคงมีความผันแปรของข้อมูลเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณสารละลายที่ไม่เท่ากันในแต่ละรอบการผลิต แต่จากการทดลองใช้จริงพบว่าวิธีการปรับปรุงที่ได้พัฒนาขึ้น ทำให้ตัวแปรตอบสนองทั้งสี่มีค่าเฉลี่ยและความผันแปรในระดับที่ปรับปรุงขึ้นมา

ถ้าหากสามารถลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนมาได้ ยังสามารถทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงด้วย ในกรณีที่สามารถลดรอบเวลาของกระบวนการได้ตามเป้าหมายกล่าวคือ จาก 12 ชั่วโมง เหลือ 8 ชั่วโมง จะทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิตได้เท่ากับ 20,160 บาท/รอบการผลิต (ลดลง 4 ชั่วโมง/รอบการผลิต = $5,040 \times 4 = 20,160$ บาท/รอบการผลิต) เนื่องจากรอบเวลาเฉลี่ยหลังการปรับปรุงของขั้นตอนที่ 1 ลดลง 3.09 ชั่วโมง และรอบเวลาเฉลี่ยหลังการปรับปรุงของขั้นตอนที่ 3 ลดลง 2.57 ชั่วโมง ดังนั้นการคำนวณผลประหยัดต้นทุนของกระบวนการจะคำนวณจากรอบเวลาของขั้นตอนที่ยาวนานกว่า ซึ่งก็คือขั้นตอนที่ 3 เพราะลดรอบการผลิตได้น้อยกว่า จึงสรุปผลประหยัดต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 12,952.8 บาท/รอบการผลิต (ลดลง 2.57 ชั่วโมง/รอบการผลิต = $5,040 \times 2.57 = 12,952.8$ บาท/รอบการผลิต) ซึ่ง 1 ปีจะทำการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์เฉลี่ย 325 รอบการผลิต เมื่อคำนวณต้นทุนในการผลิตที่ลดลงได้เป็นรายปี จะทำให้ประหยัดไปได้ 4,209,660 บาท/ปี

7.4 สรุปผลการควบคุมกระบวนการ

จากการทดสอบยืนยันผลเป็นการปฏิบัติการจริงด้วยสภาวะที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าปัจจัยตามที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 6 พบว่าค่าอคติของผลตอบสนองทั้ง 4 ค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลทดลอง 3 ครั้งกับค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์มีค่าไม่เกิน 5% แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมทั้งสองสภาวะของขั้นตอนที่ 1 และ 3 ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการมีความน่าเชื่อถือ เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทำนายผล

ในส่วนของการควบคุมกระบวนการนี้ ได้จัดทำวิธีการปฏิบัติงานขึ้นมาใหม่ โดยปรับตั้งค่าเครื่องจักรตามสภาวะที่เหมาะสมในบทที่ 6 และมีการติดตามควบคุมปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนองตามที่กำหนดในแผนควบคุม ซึ่งแบ่งลักษณะการติดตามควบคุมตามรายละเอียดการควบคุมดังต่อไปนี้

ปัจจัยนำเข้า ได้ทำการควบคุมและติดตามโดยใช้แบบฟอร์มการตรวจสอบ (Check Sheet)

ตัวแปรตอบสนอง ได้ทำการควบคุมและติดตามโดยใช้แบบฟอร์มการตรวจสอบและแผนควบคุม I-MR

จากการใช้เครื่องมือต่างๆในการควบคุมติดตาม พบว่ารอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่กำหนดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน ซึ่งมีรอบเวลาเฉลี่ยเท่ากับ 9.66 ชั่วโมง ซึ่งลดลงจากก่อนการปรับปรุง 2.57 ชั่วโมง มีประหยัดต้นทุนในการผลิต 4,209,660 บาท/ปี

นอกจากนี้ความเข้มข้นของเกลือและสารซัลโฟลันภายหลังการปรับปรุงนั้น ยังคงอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ซึ่งก็คือ 1% และ 3% ตามลำดับ



บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน ที่ขั้นตอนที่ 1 (ขั้นตอนการตกตะกอน) และขั้นตอนที่ 3 (ขั้นตอนการกลั่นแห้ง) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา ทั้ง 5 ขั้นตอน โดยเริ่มจากขั้นตอนการศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา (Define Phase) ขั้นตอนการวัดและการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพปัญหา (Measure Phase) ขั้นตอนการวิเคราะห์และคัดกรองปัจจัย (Analysis Phase) ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase) และขั้นตอนการยืนยันผลและการติดตามควบคุมกระบวนการ (Control Phase) โดยบทสรุปของการดำเนินการในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

8.1 การศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา

จากข้อมูลเบื้องต้นของกระบวนการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ พบว่ากระบวนการที่ทำให้รอบเวลาการผลิตยาวนานคือ รอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน เมื่อทำการวิเคราะห์กระบวนการดังกล่าว พบว่าขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่ทำให้รอบเวลาของกระบวนการผลิตยาวนาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดเป้าหมายของงานวิจัยว่า ลดระยะเวลาของทั้งสองขั้นตอนให้ใกล้เคียงกับรอบเวลาของการผลิตสารไซยานูริกฟลูออไรด์ 1 รอบการผลิตคือ 8 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการรอคอยน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้จะต้องพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดกับความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ด้วย

8.2 การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

จากการระดมสมองจากทีมงานปรับปรุงเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อรอบเวลาและความบริสุทธิ์ของสารซัลโฟลันในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ด้วยแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) วิธีการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) และแผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) ซึ่งทำให้ได้มาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อรอบเวลามากที่สุด โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปัจจัยที่จะนำไปทำการทดลอง และปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้ทันที สำหรับปัจจัยที่จะนำไปทำการทดลองนั้นได้แก่ ได้แก่ อัตราการไหลของสาร NaCl-Sul ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน ช่วงเวลารอการตกตะกอน ของขั้นตอนที่ 1 และ ความดันอากาศ อุณหภูมิ ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง ของขั้นตอนที่ 3 ส่วนปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้

พื้นที่ ได้แก่ วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน ซึ่งในปัจจุบันใช้วิธีการกรองแบบลดความดัน และการมีเกลือออกตันที่อุปกรณ์ดักจับ

8.3 การวิเคราะห์สาเหตุและการกำหนดแนวทางในการปรับปรุง

ในขั้นตอนนี้ได้ผู้วิจัยนำปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองทั้ง 8 ปัจจัย ดังมีรายละเอียดบทที่ 4 มาทำการปรับปรุง ในส่วนของปัจจัยประเภทที่สามารถทำการปรับปรุงได้ทันทีทั้งสองปัจจัยนั้นได้ทำการปรับปรุงก่อนเริ่มทำการทดลอง ซึ่งมี 2 ปัจจัยได้แก่ การตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน ซึ่งได้ทำการปรับปรุงโดยส่งไปตรวจสอบที่ห้องทดลองนอกโรงงาน และการมีเกลือออกตันที่อุปกรณ์ดักจับ ได้ทำการปรับปรุงโดยจัดให้มีการถอดอุปกรณ์ดักจับมาทำความสะอาดเดือนละครั้ง สำหรับ 6 ปัจจัยที่เหลือ แบ่งเป็นขั้นตอนที่ 1 จำนวน 3 ปัจจัยและขั้นตอนที่ 3 จำนวน 3 ปัจจัย โดยที่การทำงานของขั้นตอนที่ 1 นั้นถูกควบคุมด้วยอัตราการไหล ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน และช่วงเวลารอกการตกตะกอน กำหนดตัวแปรตอบสนองคือรอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 และค่าความเข้มข้นของเกลือ สำหรับขั้นตอนที่ 3 นั้นถูกควบคุมด้วยความดัน อุณหภูมิ และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง กำหนดตัวแปรตอบสนองคือรอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 และค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน ผู้วิจัยได้เลือกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าสำหรับกรณีที่มี 3 ปัจจัย โดยแบ่งแบบการทดลองเป็น 2 แบบการทดลองสำหรับ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมโดยนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาสภาวะค่าที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอน

จากผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ซึ่งใช้ Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) ในการเลือกพจน์ที่มีนัยสำคัญ สมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 80% ซึ่งมีความหมายว่า สมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการ สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี มีความแม่นยำในการทำนายค่าตัวแปรตอบสนอง ต่อจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย โดยใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plots) เพื่ออธิบายทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนอง

8.4 การปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้ได้นำสมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการในบทที่ 5 มาวิเคราะห์หาค่าของปัจจัยปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม และจากผลการวิเคราะห์ Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 1 คือ อัตราการไหลเท่ากับ 1,115 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนเท่ากับ 0.5 รอบ/นาที และช่วงเวลารอกการตกตะกอนเท่ากับ 0

ชั่วโมง จะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 9.1257 ชั่วโมง และค่าความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 0.7289% สำหรับสถานะที่เหมาะสมของขั้นตอนที่ 3 คือ ความดันเท่ากับ 30 mbar อุณหภูมิเท่ากับ 180 °C และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งเท่ากับ 20 รอบ/นาที จะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 เท่ากับ 9.6393 ชั่วโมง และค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันเท่ากับ 1.095%

8.5 การยืนยันผลและการควบคุมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบยืนยันผลเป็นการปฏิบัติการจริงด้วยสถานะที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าปัจจัยตามที่ได้จากการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม แล้วจึงทำการทดลองยืนยันผลซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าอคติ พบว่าค่าอคติที่ได้มีค่าไม่เกิน 5% ทั้ง 4 ค่า จึงสรุปได้ว่าสมการทั้ง 4 มีความน่าเชื่อถือ เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทำนายผล

ในส่วนของการควบคุมกระบวนการนี้ ได้จัดทำวิธีการปฏิบัติงานขึ้นมาใหม่ โดยปรับตั้งค่าเครื่องจักรตามสถานะที่เหมาะสมในบทที่ 6 และมีการติดตามควบคุมปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนองตามที่กำหนดในแผนควบคุม ซึ่งแบ่งลักษณะการติดตามควบคุมตามรายละเอียดการควบคุมดังต่อไปนี้

ปัจจัยนำเข้า ได้ทำการควบคุมและติดตามโดยใช้แบบฟอร์มการตรวจสอบ (Check Sheet)

ตัวแปรตอบสนอง ได้ทำการควบคุมและติดตามโดยใช้แบบฟอร์มการตรวจสอบ และแผนควบคุม I-MR

จากการใช้เครื่องมือต่างๆในการควบคุมติดตาม พบว่ารอบเวลาของขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่กำหนดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน ซึ่งมีรอบเวลาเฉลี่ยเท่ากับ 9.66 ชั่วโมง ซึ่งลดลงจากก่อนการปรับปรุง 2.57 ชั่วโมง มีประหยัดต้นทุนในการผลิต 4,209,660 บาท/ปี นอกจากนี้ความเข้มข้นของเกลือและสารซัลโฟลันภายหลังการปรับปรุงนั้น ยังคงอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ซึ่งก็คือ 1% และ 3% ตามลำดับ

8.6 ข้อจำกัด

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ คือ สมการความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการ สามารถใช้ทำนายค่าตัวแปรตอบสนองได้ภายในขอบเขตของระดับปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เท่านั้น ถ้าหากว่าปริมาณสารตั้งต้นของการผลิตเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งอาจส่งผลมีปริมาณเกลือมากขึ้นหรือลดลง ผลการวิเคราะห์สถานะการทดลองที่เหมาะสมที่กล่าวมา อาจเปลี่ยนแปลงไปจากงานวิจัยนี้ นอกจากนี้การกำหนดขอบเขตของระดับการทดลองอาจจะเปลี่ยนแปลงไป ถ้าหากเปลี่ยนตัวทำละลายจากเดิมคือสารซัลโฟ

ลานไปเป็นสารอื่น อาจจะทำให้สถานะที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน เนื่องจากสมบัติของสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

8.7 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษาไว้ในขอบเขตที่ปฏิบัติงานในปัจจุบันเท่านั้น ซึ่งมีบางปัจจัยที่สามารถปรับตั้งค่าให้อยู่นอกขอบเขตที่ทำการวิจัยได้ จึงแนะนำให้ทำการทดลองเพิ่มเติมในช่วงของปัจจัยที่อยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยได้ ซึ่งอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น อีกทั้งอาจมีปัจจัยอื่นๆที่มีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองนอกเหนือจากในงานวิจัยนี้ที่ไม่ได้เลือกมาศึกษา จึงควรศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยครั้งต่อไป



รายการอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร.นภัสสรวงศ์ โอสสถศิลป์, การออกแบบการทดลอง, เอกสารประกอบการเรียนวิชา การปรับปรุงคุณภาพ, 2559.
- [2] J. R. Evans and W. M. Lindsay, *An Introduction to Six Sigma & Process Improvement*, South-Western, Thomson, 2005.
- [3] S. Buddhachakara, "Cycle time reduction in ball bearing production process," Meng Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2013.
- [4] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.
- [5] R. Cavanaugh, R. Neuman, and P. Pande, *เส้นทางสู่ Six Sigma*. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, 2548.
- [6] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8 ed., John Wiley & Sons, 2013.
- [7] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, 2551.
- [8] สายชล สีนสมบูรณ์ทอง, การวางแผนแบบการทดลอง เล่ม 2. จามจุรี โปรดักท์, 2558.
- [9] ธนากร เกียรติบรรลือ, "FMEA การวิเคราะห์ความล้มเหลวในการผลิต," อินดัสเทรียล เทคโนโลยี รีวิว, ปีที่ 7, ฉบับที่ 73, หน้า 101-105, 2543.
- [10] Y. Wang, G. Cheng, H. Hu, and W. Wu, "Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, no. 6, pp. 958-965, Nov. 2012.
- [11] Ford Motor Company, *Failure Mode and Effects Analysis*. Ford Motor Company, 2004.
- [12] Automotive Industrial Action Group, *Potential Failure Mode and Effects Analysis*, 3 ed., 2001.
- [13] A.M. Goula, M. Kostoglou, and T. D. Karapantsios, "A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment: Case study: The

- influence of a feed flow control baffle," *Chemical Engineering Journal*, vol. 140, no. 1-3, pp. 110-121, Jul. 2008.
- [14] F. Rieger and P. Ditzl, "Suspension of Solid Particles," *Chemical Engineering Science*, vol. 49, no. 14, pp. 2219-2227, Jul. 1994.
- [15] F. Rieger, "Effect of Particle Content on Agitator Speed for Off-bottom Suspension," *Chemical Engineering and Processing : Process Intensification*, vol. 41, no. 4, pp. 381-384, Apr. 2002.
- [16] A. Senol, "Solvation-Based Vapour Pressure Model for (Solvent-Salt) Systems in Conjunction with the Antoine Equation," *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 67, pp. 28-39, Dec. 2013.
- [17] G.W. Thomson, "The Antoine Equation for Vapor-Pressure Data," *Chemical Reviews*, vol. 38, no. 1, pp. 1 - 39, Feb. 1946.
- [18] S. Grob, S. Laabs, A. Scherrmann, A. Sudau, N. Zhang, and U. Nubbemeyer, "Improved Syntheses of Cyanuric Fluoride and Carboxylic Acid Fluorides," *Advanced Synthesis & Catalysis*, vol. 342, no. 7, pp. 711-714, Sep. 2000.
- [19] C.W. Tullock and D. D. Coffman, "Synthesis of Fluorides by Metathesis with Sodium Fluoride," *The Journal of Organic Chemistry*, vol. 25, no. 11, pp. 2016-2019, Nov. 1960.
- [20] N. Sellappan and K. Palanikumar, "Development of Modified Evaluation and Prioritization of Risk Priority Number in FMEA," *International Journal of Engineering (IJE)*, vol. 7, no. 1, 2013.
- [21] B.M. Miller and I.J. Chetty, "An Alternative Metric for Detecting High-Severity Incident Reports Analyzed Using FMEA," *International Journal of Radiation Oncology * Biology * Physics*, vol. 93, no. 3, p. S16, Nov. 2015.
- [22] สุชาติ ประสิทธิ์รัฐสินธุ์, การใช้สถิติในงานวิจัยอย่างถูกต้องและได้มาตรฐานสากล. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดสามลดา, 2548.
- [23] ยุทธ ไทยวรรณ, การวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรสำหรับงานวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท วี.พรีนท์ (1991) จำกัด, 2556.
- [24] R.H. Lindeman, P.F. Merenda, and R.Z. Gold, *Introduction to Bivariate and Multivariate Analysis*, Foresman and Compant, 1980.

- [25] เพ็ญแข ศิริวรรณ, สถิติเพื่อการวิจัย โดยใช้คอมพิวเตอร์ (SPSS Version 10). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2546.
- [26] เพชรน้อย สิงห์ช่างชัย, หลักการใช้สถิติการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัว สำหรับการวิจัยทางการพยาบาล. พิมพ์ครั้งที่ 4. สงขลา : ชานเมืองการพิมพ์, 2549.
- [27] R.L. Burden, and J.D. Faires, *Numerical Analysis*, Thomson Learning, 2001.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอริยา สุวรรณนิกรกุล เกิดเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ.2534 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีวัดมหาพฤฒาราม ในพระบรมราชินูปถัมภ์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร และได้เข้าศึกษาต่อจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2556 หลังจากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

