การปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำอ่อน

นายอลงกรณ์ ศรกาญจนอัมพร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF SOFT WATER PRODUCTION PROCESS

Mr. Alongkorn Sornkanjanaumphon

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำอ่อน
โดย	นายอลงกรณ์ ศรกาญจนอัมพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

---------- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---------- ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

---------- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

---------- กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

---------- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อลงกรณ์ ศรกาญจนอัมพร : การปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำอ่อน. (IMPROVEMENT OF SOFT WATER PRODUCTION PROCESS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงระบบการผลิตน้ำอ่อน โดยมุ่งไปที่การเพิ่มปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบและลดปริมาณน้ำกระด้างที่เกินมาตรฐาน ผู้วิจัยได้ทำวิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหาโดยใช้เทคนิคแผนผังก้างปลา และใช้เทคนิค FMEA พบว่ามี 20 ปัจจัย และดำเนินการแก้ไขปรับปรุงสาเหตุของข้อบกพร่องดังแนวทางดังต่อไปนี้ 1) ปรับปรุงระบบการผลิตเป็นระบบอัตโนมัติ โดยการติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำ ตรวจจับทุก 30 วินาที และปรับปรุงระบบการฟื้นฟูเรซิ่นให้ฟื้นฟูโดยอัตโนมัติ 2) จัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน 3) ออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยศึกษาทั้ง 4 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญดังนี้ อัตราการไหลเข้าศึกษาที่ระดับ 30 ถึง 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินศึกษาที่ระดับ 5 ถึง 15 นาที อัตราการไหลล้างกลับศึกษาที่ระดับ 5 ถึง 15 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำเกลือศึกษาที่ระดับ 5 ถึง 15 % จากการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้ง 4 ปัจจัยเป็นดังนี้ อัตราการไหลเข้า 42 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน 15 นาที อัตราการไหลล้างกลับ 15 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำเกลือ 15 %

ผลที่ได้จากการปรับปรุง ปริมาณน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐานลดลงจาก 4,437 ลิตร เป็น 502 ลิตร คิดเป็น 88.69 % ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่นเพิ่มขึ้นจาก 1,681 ลูกบาศก์เมตร เป็น 1,992 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็น 18.5 % ความสามารถพื้นฐานในการกำจัดความกระด้างของเรซิ่นเพิ่มขึ้นจากเดิม 49.98 กรัมต่อลิตร เป็น 59.22 กรัมต่อลิตร และค่าความเสี่ยงชี้นำลดลง 88.38%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6070991021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORD: Failure modes and effects analysis (FMEA), DESIGN RESEARCH

Alongkorn Sornkanjanaumphon : IMPROVEMENT OF SOFT WATER PRODUCTION PROCESS . Advisor: Assoc. Prof. Somkiat Tangjitsitcharoen, Ph.D.

This research aimed at studying into the improvement of the soft water production system with the focus on the increase of soft water content per resin cycle and the reduction of water hardness.The researcher has analyzed and found the cause of the problem by using the fishbone diagram and using FMEA technique. There are 20 factors and the causes of the defects are improved as follows: 1) Improve the production system to be automatic by installing a water hardness analyzer, it detects every 30 seconds and automatically improves the resin regeneration system. 2) Make a operation manual 3)Design an experiment to determine the optimal parameters by studying 4 significant factors,By researching inflow rate level 30 to 50 cubic meter per hour, the recovery resin level 10 to 15 minutes,the backwash flow rate level 10 to 15 cubic meter per hour ,the brine concentration level 10 to 15 % ,the values are as follows The optimum inflow rate was 42 cubic meter per hour.The optimum recovery resin period was 15 minutes. The optimum backwash flow rate was 15 cubic meter per hour and the optmum brine concentration was 15 %

After improvement , The excess soft water content decreased from 4,437 liters to 502 liters or 88.69% ,the soft water content per resin cycle increased from 1,681 cubic meter to 1,992 cubic meter or 18.5% ,the basic capacity resin

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Industrial Engineering Student's Signature .....
Academic Year: 2020 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำจาก รศ.ดร.สมเกียรติ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยแนะนำให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาเป็นอย่างดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบ รศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ กรรมการสอบ และ ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผู้บริหาร และพนักงาน ของโรงงานกรณีศึกษา ที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูล และร่วมกันทำโครงการปรับปรุงนี้ร่วมกัน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนนิสิตที่ให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดี

อลงกรณ์ ศรกาญจนอัมพร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ข้อมูลทั่วไปของระบบบำบัดน้ำ 2

1.3 สภาพและความสำคัญของปัญหา 7

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 8

1.5 ขอบเขตการวิจัย 9

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย 9

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 9

1.8 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย 10

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

2.1 ประเภทของแหล่งน้ำ 11

2.2 ความกระด้างของน้ำ (Water Hardness) 12

2.3 สารปนเปื้อนในน้ำ 12

2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน 15

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน 17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6 ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....19
2.7 ระบบควบคุมวงปิด (Closed Loop Control System).....20
2.8 ผังก้างปลา (fishbone diagram).....23
2.9 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis).....25
2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment).....31
2.8 การทดลองแฟกเทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สองระดับ.....33
2.9 การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Designs; CCD).....36
2.10 การทดลองแบบ Box- Behnken (Box-Behnken Designs).....38
2.11 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing).....41
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....44
บทที่ 3 การหาสาเหตุและวิเคราะห์ข้อบกพร่อง.....47
3.1 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการรั่วไหลของน้ำกระด้าง.....47
3.1.1 การหาสาเหตุของข้อบกพร่องการรั่วไหลของน้ำกระด้าง.....48
3.2 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่นมีปริมาณน้อย.....50
3.2.1 การหาสาเหตุของข้อบกพร่องปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบได้น้อย.....51
3.3 สรุปสาเหตุที่เป็นไปได้ในการเกิดปัญหา.....53
3.4 การประเมินข้อบกพร่อง (Severity of failures : S).....54
3.4 การประเมินโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence : O) และการความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (Detection : D).....56
บทที่ 4 แนวทางการปรับปรุงและดำเนินการแก้ไข.....65
4.1 ปัญหาพนักงานขาดประสบการณ์.....65
4.2 ปัญหาการแจ้งเตือนการเสื่อมสภาพของเรซิ่น.....67
4.3 การแก้สาเหตุพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม.....68
4.3.1 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken).....69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง....71
4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง....73
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำที่ผลิตได้....76
4.3.5 ผลกระทบหลักของปัจจัยนำเข้าต่อปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน....77
4.3.6 ผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน (B) กับความเข้มข้นของน้ำเกลือ (D) 79
4.3.7 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า....80
4.3.8 ผลของตัวแปรต้นต่อค่าความกระด้างของน้ำ (Hardness)....80
4.3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้ากับปริมาณความกระด้างที่เปลี่ยนไป....84
บทที่ 5 การทดสอบและยืนยันผล....87
5.1 ขั้นตอนในการทดสอบเพื่อยืนยันผล....87
5.2 ผลการทดลอง....87
5.3 การทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง....89
5.4 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงชี้นำ (RPN) ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ.... 101
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.... 103
6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.... 103
6.2 อุปสรรคในงานวิจัย.... 104
6.3 ข้อเสนอแนะ.... 105
บรรณานุกรม.... 106
ภาคผนวก.... 108
ภาคผนวก ก คู่มือการปฏิบัติงาน.... 109
ภาคผนวก ข การคำนวณ Basic capacity resin (T.P.Sivanandan 2020).... 116
ประวัติผู้เขียน.... 117

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ปริมาณน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐานต่อเดือน 8

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ FMEA 26

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การประเมินโอกาสการเกิดขึ้น (O) สำหรับ FMEA 27

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจ (D) สำหรับ FMEA 27

ตารางที่ 2.4 เมทริกซ์การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสองปัจจัยที่สองระดับ 34

ตารางที่ 2.5 เมทริกซ์การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสองปัจจัยที่สองระดับ กรณีทำซ้ำ 2 ครั้ง 34

ตารางที่ 2.6 แผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง กรณีมี 3 ปัจจัย 37

ตารางที่ 2.7 รูปแบบย่อของแผนการทดลอง Box – Behnken กรณี 4 ปัจจัย 39

ตารางที่ 2.8 แผนการทดลอง Box – Behnken กรณี 4 ปัจจัย 39

ตารางที่ 3.1 แสดงลักษณะปัญหาและสาเหตุ 53

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์ความรุนแรงของข้อบกพร่อง 54

ตารางที่ 3.3 ความรุนแรงของข้อบกพร่อง 55

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์การประเมินโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (O) 56

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบข้อบกพร่อง (D) 56

ตารางที่ 3.6 สรุปคะแนนความถี่ในการเกิดข้อบกพร่อง (O) 61

ตารางที่ 3.7 ค่า RPN ที่เกิดขึ้น 63

ตารางที่ 3.8 ปัจจัยที่จะดำเนินการแก้ไข 64

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับของการทดลอง 69

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Metrix) 70

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองตามลำดับจากโปรแกรม MINITAB 72

ตารางที่ 4.4 ปัจจัยควบคุม 84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการปรับอัตราการไหลเข้าถังน้ำอ่อน.....85
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้ากับค่าเฉลี่ย %การลดลงของความกระด้าง.....86
ตารางที่ 4.7 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า.....86
ตารางที่ 5.1 ค่าระดับปัจจัยในการทดลอง.....87
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองหลังจากการปรับพารามิเตอร์.....88
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง.....89
ตารางที่ 5.4 ปริมาณน้ำกระด้างที่เกินมาตรฐานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง.....99
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าความเสี่ยงชี้นำก่อนปรับปรุงและหลังการปรับปรุง..... 102
ตารางที่ 6.1 แสดงปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง..... 104

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 กระบวนการเตรียมน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัด (Pre-treatment).....3

รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการผลิตน้ำอ่อน 5

รูปที่ 1.3 การแปลผลการทดสอบความกระด้างของน้ำอ่อนที่หน้างาน 6

รูปที่ 1.4 ปริมาณน้ำอ่อนที่ต้องการกับค่าความสามารถในการผลิตน้ำอ่อน 7

รูปที่ 1.5 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย 10

รูปที่ 2.1 ลักษณะเม็ดเรซิ่น.....16

รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างเรซิ่น 17

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณรีเจนเนอแรนต์กับอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน.....17

รูปที่ 2.4 แสดงระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop Control System) 20

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ PLC 21

รูปที่ 2.6 อุปกรณ์อินพุต (Field Input) 21

รูปที่ 2.7 Input Unit 22

รูปที่ 2.8 หน่วยประมวลผล ของ PLC รุ่น s7-1200.....22

รูปที่ 2.9 หน่วยเอาต์พุต (Output Unit).....23

รูปที่ 2.10 อุปกรณ์เอาต์พุต (Output device) 23

รูปที่ 2.11 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลกรณีสองปัจจัยที่สองระดับ.....33

รูปที่ 2.12 ค่าตัวแปรตอบสนองที่สภาวะการทดลองทั้ง 4 สภาวะ.....35

รูปที่ 2.13 แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย.....36

รูปที่ 2.14 แสดงกราฟการทดลองแบบส่วนประสมกลาง กรณีมี 3 ปัจจัย.....38

รูปที่ 2.15 รูปแบบเรขาคณิตของแผนการทดลอง Box – Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย.....41

รูปที่ 3.1 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์ปัญหาการรั่วไหลของน้ำกระด้าง.....47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.2 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์ปัญหาปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบน้อย 50
รูปที่ 4.1 วาล์ว Softener แบบ manual 65
รูปที่ 4.2 วาล์ว Softener แบบ Automation 66
รูปที่ 4.3 หน้าจอ HMI ที่ติดตั้งใหม่ 66
รูปที่ 4.4 Hardness analyzer 67
รูปที่ 4.5 ระบบเครือข่ายสำหรับตรวจค่าความกระด้าง 68
รูปที่ 4.6 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ.....73
รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างค่าตกค้างและค่าประมาณ 74
รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับข้อมูล.....75
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบ.....76
รูปที่ 4.10 ผลกระทบหลักของปัจจัยนำเข้าต่อปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน.....77
รูปที่ 4.11 ข้อมูลอัตราการไหลของผู้ผลิต.....78
รูปที่ 4.12 ข้อมูลระดับการฟื้นฟูของผู้ผลิต 78
รูปที่ 4.13 ผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินกับความเข้มข้นของน้ำเกลือ 79
รูปที่ 4.14 ผลการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด 80
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าความกระด้างของน้ำ 81
รูปที่ 4.16 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับความกระด้างของน้ำ.....82
รูปที่ 4.17 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน 82
รูปที่ 4.18 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับความกระด้างของน้ำ.....83
รูปที่ 4.19 อิทธิพลหลักระหว่างอัตราการไหลเข้ากับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน 83
รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 90
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 1.....91
รูปที่ 5.3 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 2.....91
รูปที่ 5.5 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 4.....92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5.4 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 3.....92
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 5.....93
รูปที่ 5.7ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 6.....93
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 7.....94
รูปที่ 5.9 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 8.....94
รูปที่ 5.10 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 9 95
รูปที่ 5.11 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 10.....95
รูปที่ 5.13 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 12.....96
รูปที่ 5.12 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 11.....96
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 13.....97
รูปที่ 5.15 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 14.....97
รูปที่ 5.16 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 15.....98
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง..... 100
รูปที่ 5.18 แสดงค่า RPN ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ 101

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

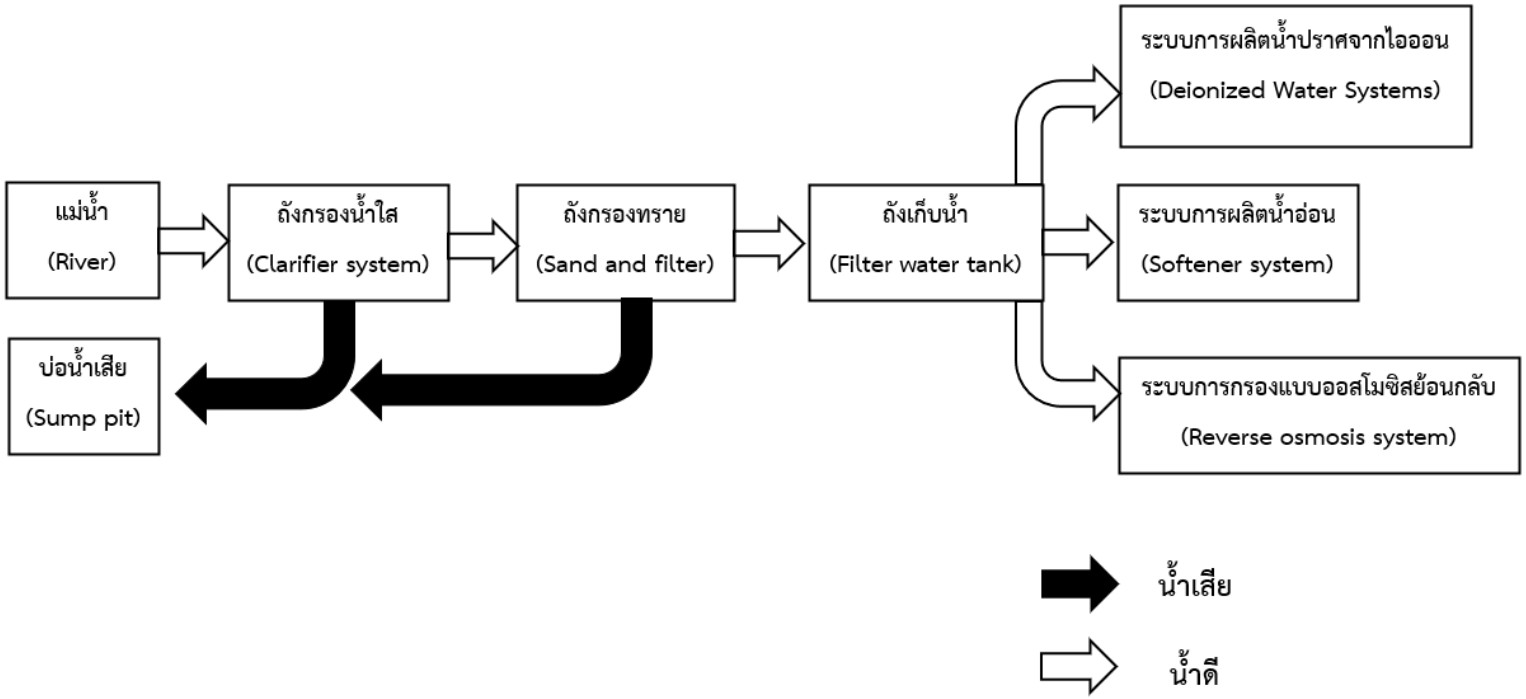
ในสภาพปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องดื่มมีอัตราการแข่งขันสูง ปัจจัยที่ทำให้เกิดความได้เปรียบปัจจัยหนึ่งคือ วัตถุดิบ ซึ่งแต่ละอุตสาหกรรมมีวัตถุดิบที่ต่างกัน แต่วัตถุดิบที่อุตสาหกรรมเครื่องดื่มจำเป็นต้องมีเหมือนกันคือน้ำ น้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานของอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ไม่ว่าจะทางตรงหรือทางอ้อม ซึ่งโรงงานสามารถผลิตเอง หรือซื้อกับการประปานครหลวงได้ แต่ต้นทุนการผลิตจะสูง ฉะนั้นหลายโรงงานจึงเลือกที่จะผลิตน้ำใช้ในโรงงานเอง ทั้งนี้การผลิตน้ำเองเพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม จะต้องมีการควบคุมคุณภาพที่แม่นยำ และค่าคุณภาพที่ได้เป็นค่าจริงในขณะนั้น (Real time)

กระบวนการผลิตน้ำในโรงงาน มีหลายประเภทแบ่งตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำ โดยการบำบัดน้ำในโรงงานส่วนใหญ่จะใช้ น้ำอาร์โอ (Reverse Osmosis), น้ำอ่อน (Softener) และน้ำดีมีน (Demin) ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้น้ำว่าเหมาะกับน้ำคุณภาพแบบไหน ดังตัวอย่างเช่น หม้อต้มไอน้ำของโรงงานตัวอย่าง จะใช้น้ำอ่อน (Softener) ในการป้อน เพื่อต้องการให้เป็นไอน้ำ แล้วใช้ไอน้ำในการกลั่นสุราและหมักส่า หรือในห้องทดลองของโรงงาน การล้างเครื่องมือหรือน้ำที่ใช้ในการทดลองจะใช้น้ำดีมีน เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำดีมีนจะไม่มีแร่ธาตุ ด้วยเหตุนี้ในโรงงานที่ผลิตน้ำใช้เอง จำเป็นต้องมี Stock น้ำที่เพียงพอ เพื่อใช้ในยามฉุกเฉิน นอกจากปริมาณน้ำที่ต้องคำนึง คุณภาพน้ำก็เป็นส่วนที่สำคัญ เพราะการใช้หม้อต้มไอน้ำ ถ้าน้ำมีความกระด้างสูง จะทำให้เกิดตะกรันที่หม้อไอน้ำ ทำให้การใช้ปริมาณเชื้อเพลิงในการต้มน้ำเป็นไอน้ำใช้มากขึ้น เนื่องจากมีตะกรันที่เกิดจากน้ำกระด้างไปเกาะที่ผิวหม้อต้มไอน้ำ ทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดี หรือการใช้น้ำ Softener ในการล้างขวด ถ้าน้ำมีความกระด้างมากจะสิ้นเปลืองการทำความสะอาดขวดสุรามากขึ้น

1.2 ข้อมูลทั่วไปของระบบบำบัดน้ำ

โรงงานของกรณีศึกษานี้มีการใช้น้ำในปริมาณมาก เพราะเป็นบริษัทผลิตเครื่องดื่ม ทำให้เรื่องประสิทธิภาพการบำบัดน้ำและต้นทุนการบำบัดน้ำเป็นสิ่งที่สำคัญ น้ำที่ใช้ในการบำบัดเป็นน้ำจากแม่น้ำผ่านกระบวนการเตรียมก่อนเข้าสู่ระบบ (Pre-treatment) ในขั้นตอนนี้ เป็นการบำบัดน้ำเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ระบบผลิต น้ำอาร์โอ (Reverse Osmosis), น้ำอ่อน (Softener) และน้ำดีมีน (Demin) ประกอบไปด้วย การดูดน้ำจากแม่น้ำ (Raw water) ขึ้นมาเก็บไว้ที่บ่อพักน้ำ (Clarifier system) ในกระบวนการมีเป็นการเติมสารส้มเข้มข้น 10% และมีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อชดเชยค่าความเป็นกรด สารส้มจะทำให้เกิดจับตัวของอนุภาคเกิดขึ้น ทำให้ตกตะกอนที่ก้นบ่อ (Sludge) การกำจัดตะกอนจะใช้มอเตอร์ดูดไปเก็บไว้ที่บ่อพักน้ำทิ้ง (Sump pit) เพื่อรอการกำจัดต่อไป เมื่อผ่านการตกตะกอนแล้วจะเข้าสู่การกรองที่ถังกรองทราย (Sand and filter) ในกระบวนการนี้เป็นการกรองตะกอน ดูดสี ดูดกลิ่น โดยใช้ทรายในถังเป็นตัวกรอง หลังจากผ่านการกรองแล้วจะส่งน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (Pre-treatment) ไปที่ถังเก็บน้ำกรอง (Filtered water tank) เพื่อรอเข้ากระบวนการผลิตน้ำอ่อนถัดไป ดังรูปที่ 1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1.1 กระบวนการเตรียมน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัด (Pre-treatment)

1.2.1 วัฏจักรการผลิตน้ำอ่อน

ในขณะที่เครื่องกรองน้ำมีวัฏจักรในการทำงานเพียง 2 ขั้นตอน คือ กรองน้ำ และล้างย้อน แต่ถังเรซินมีการทำงานถึง 4 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน คือ

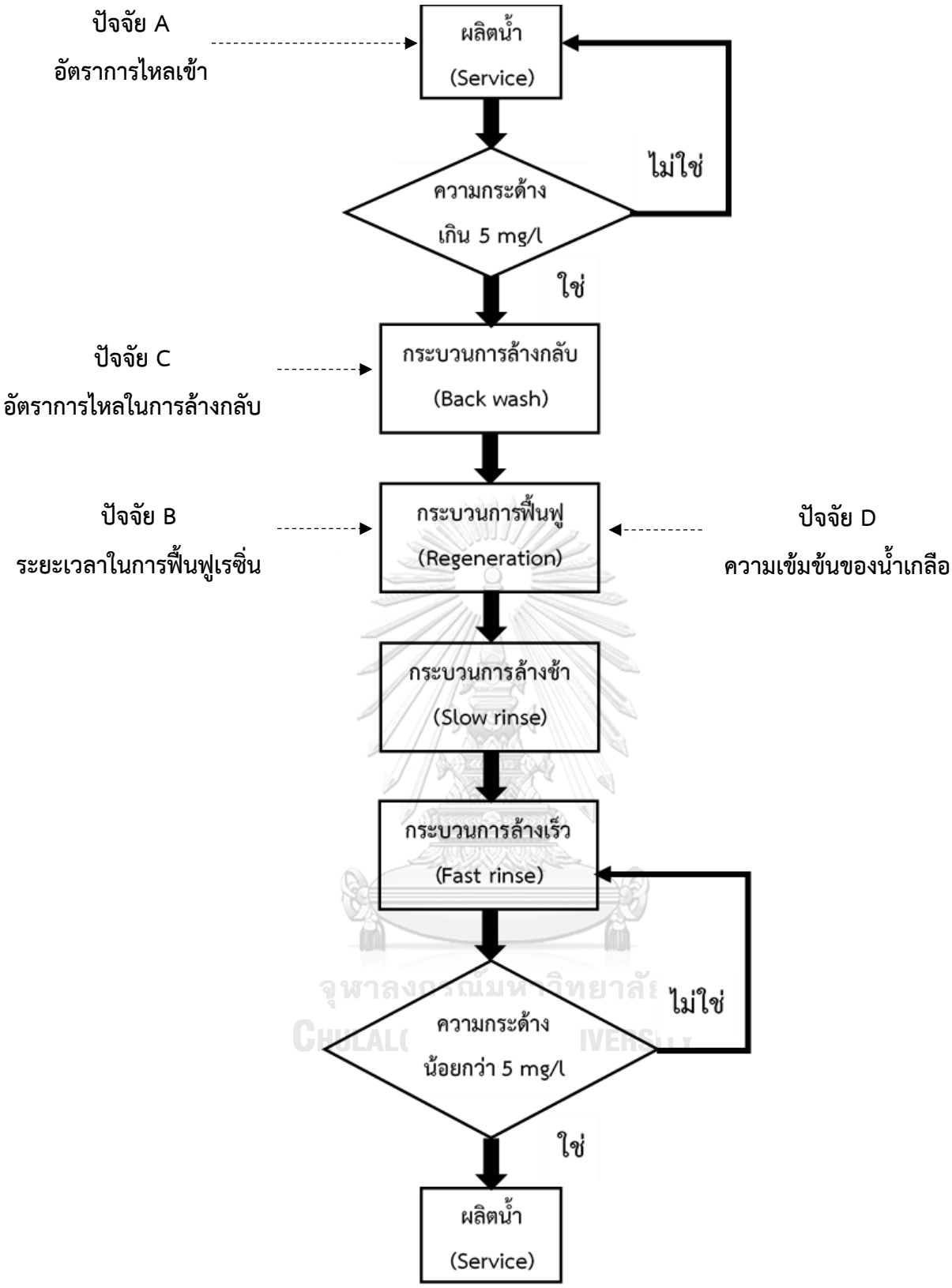
1) การแลกเปลี่ยนอิออน (Service) ขั้นตอนนี้ถือเป็นหน้าที่หลักของเรซิน กล่าวคือ อิออนอิสระในเรซินจะถูกแลกเปลี่ยนกับ อิออนอื่นๆในน้ำดิบ ทำให้น้ำสพอาดตามต้องการ ขั้นตอนนี้จะยุติลงเมื่ออิออนอิสระของเรซินเหลืออยู่น้อย จนกระทั่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนอิออนต่างๆในน้ำดิบได้ อายุในแต่ละวัฏจักรของเรซินขึ้นอยู่กับปริมาณอิออนในน้ำดับ และขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิออนของเรซิน หน่วยของอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินจะหน่วยเป็น แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตของเรซิน เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดทั้งชั้นของเรซิน หน่วยจึงเป็นอัตราการไหลต่อปริมาตรของเรซิน

2) การล้างกลับ (Backwash) หลังจากเรซินหมดอำนาจ (แต่ยังไม่เสีย) จำเป็นต้องมีการล้างย้อนเพื่อให้ชั้นเรซินเกิดการขยายตัว เพื่อวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้ ทำลายการจับตัวเป็นก้อนของเรซิน , เพื่อล้างความขุ่นหรือตะกอนแขวนลอยที่ติดอยู่ในชั้นเรซิน , เพื่อกำจัดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นและค้างอยู่ในชั้นเรซิน และเพื่อทำให้มีการเรียงชั้นใหม่ของเรซิน ซึ่งช่วยให้การกระจายน้ำผ่านชั้นเรซินเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ

3) การฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) เมื่อเรซินได้ทำการแลกเปลี่ยนอิออนกับน้ำดับจนอิออนอิสระของเรซินเหลือน้อยจนไม่สามารถทำการแลกเปลี่ยนอิออนต่อไปได้อีก จำเป็นต้องมีการฟื้นฟูสภาพการใช้งานของเรซิน โดยการขับไล่อิออนในเรซินที่แลกมาจากน้ำดิบ แล้วเติมอิออนอิสระที่อยู่ในรูปของเรซินเริ่มต้นลงไปให้เรซิน ทำให้เรซินกลับคืนสู่สภาพเดิม และมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนอิออนอีกครั้ง สารเคมีที่ใช้เติมอิออนอิสระให้กับเรซินที่เสื่อมอำนาจไปแล้ว เรียกว่า สารรีเจนเนอแรนด์ (Regenerant) โดยสำหรับระบบของทาง Thai Standard Industries Resin ที่ใช้จะอยู่ในรูปอิออนของโซเดียม (Na) และใช้สารเคมีคือ เกลือ (NaCl) ในการ Regeneration

4) การชะล้างสารเคมี (Rinse) หลังจากผ่านขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซินแล้ว ย่อมมีสารเคมีตกค้างอยู่ในชั้นของเรซิน จึงต้องใช้น้ำสะอาดล้างเรซิน เพื่อขับไล่สารเคมีเหล่านั้นให้หลุดออกจากชั้นเรซิน การล้างมี 2 ขั้นตอน คือ การชะล้างอย่างช้า (Slow rinse) โดยใช้น้ำในการล้างเท่าหนึ่งของปริมาตรของชั้นเรซินโดยไหลในอัตราเดียวกันกับการฟื้นฟูสภาพ หลังจากนั้นจะเป็น การชะล้างอย่างเร็ว (Fast rinse) เพื่อขับไล่สารเคมีที่หลงเหลืออยู่น้อยให้หลุดออกไปให้หมด จึงใช้การล้างเร็วได้ วัฏจักรการผลิตน้ำอ่อนแสดงดังรูปที่ 1.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการผลิตน้ำอ่อน

1.2.2 การตรวจวัดค่าความกระด้างที่หน้างาน (Onsite Hardness testing)

ในการตรวจวัดค่าความกระด้างของน้ำที่หน้างานจะเป็นการนับจำนวนรอบการผลิตน้ำอ่อน เมื่อผลิตน้ำไปได้ปริมาณ 1700 ลูกบาศก์เมตร จะใช้ตัวทดสอบความกระด้างของน้ำแบบหยดเป็นตัวทดสอบ เนื่องจากตัวทดสอบนี้สามารถให้ผลการทดสอบได้ทันที ตัวทดสอบที่โรงงานตัวอย่างใช้ ยี่ห้อ V-unique รุ่น v-color0525 ย่านการใช้งาน 0-25 mg/l as $CaCO_3$ การทดสอบมีวิธีการดังนี้

1) ดูดน้ำอ่อนที่ต้องการทดสอบปริมาณ 5 ml

2) หยดน้ำยาที่ใช้ทดสอบจำนวน 1 หยด แล้วเขย่า

3) เทียบสีของสารที่ได้กับสีมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 1.3

รูปที่ 1.3 การแปลผลการทดสอบความกระด้างของน้ำอ่อนที่หน้างาน

1.2.3 การตรวจวัดความกระด้างในห้องทดลอง (Lab hardness testing)

การตรวจวัดตามหัวข้อ 1.2.2 เป็นการตรวจวัดโดยพนักงานโดยไม่ต้องการความละเอียด แต่การทดสอบความกระด้างของน้ำเพื่อเก็บบันทึกผล และส่งผลไปให้หน่วยงานภายนอก หรือให้ลูกค้าจำเป็นต้องทดสอบโดยละเอียดด้วยวิธีไตเตรทดังนี้

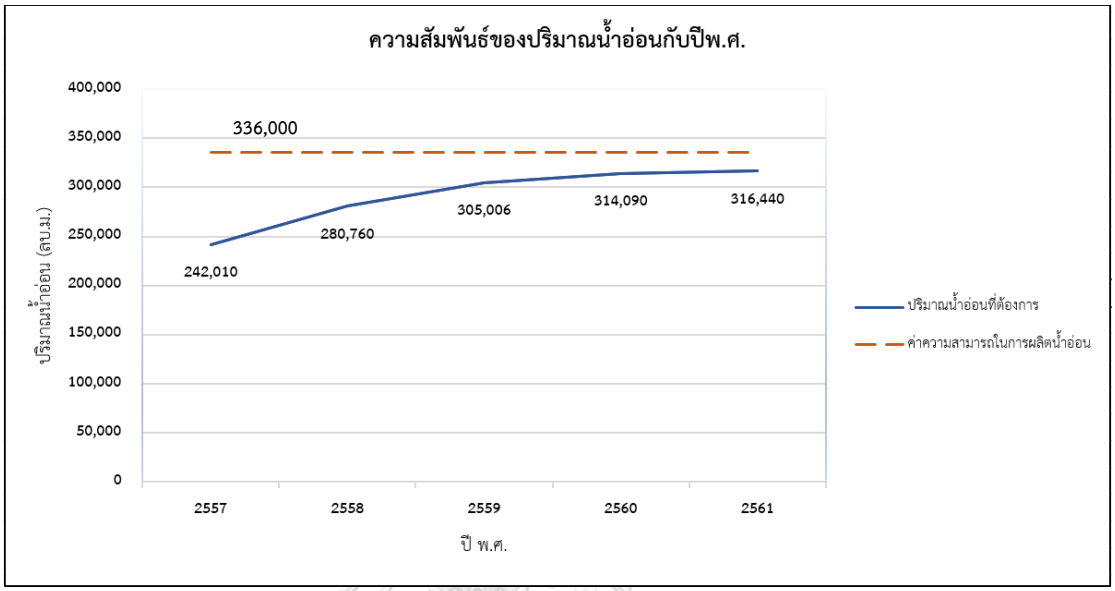
1) เตรียมน้ำอ่อนตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ 2 มิลลิลิตร โดยละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 6.8 กรัม ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) 57 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร

2) เติมอินดิเคเตอร์ Eriochrome black-T 4-5 หยด

3) ไตเตรทด้วยเอทิลินไดเอมีนเตรตตระอะซิเตท ไดไฮเดรท (EDTA) 3.723 กรัมและเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร คำนวณความกระด้าง = $\frac{M_{EDTA} V_{EDTA} x MW_{CaCO_3}}{V_{Sample}} x100$

1.3 สภาพและความสำคัญของปัญหา

ปริมาณการผลิตน้ำอ่อนถูกกำหนดจากความต้องการน้ำอ่อนทั้ง 4 แผนก คือ แผนกต้นกำลัง แผนกบรรจุขวด และหอผึ่งน้ำ ความต้องการน้ำอ่อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกปี อันเนื่องมาจากการขยายการผลิต ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ปริมาณน้ำอ่อนที่ต้องการกับค่าความสามารถในการผลิตน้ำอ่อน

ปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้จะมีการรั่วไหลเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการตรวจสอบน้ำเสียที่ออกจากการผลิตน้ำอ่อนไม่แม่นยำ ทำให้เกิดการสูญเปล่าในการผลิต เพราะปริมาณน้ำที่ผลิตจากเรซิ่นที่เสื่อมสภาพจะให้ค่าความกระด้าง (Hardness) ที่เกินมาตรฐาน

ความสามารถในการบำบัดของน้ำอ่อนวัดจากความสามารถพื้นฐานในการกำจัดความกระด้างของเรซิ่น (Basic capacity) ปัจจุบันมีค่าอยู่ที่ 49.98 g/l (ภาคผนวก ข)

ฉะนั้นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตต่อรอบเรซิ่นจึงมีความสำคัญกับการเพิ่มความสามารถพื้นฐานในการกำจัดความกระด้างของเรซิ่น (Basic capacity) โดยเพิ่มปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบ และการปรับปรุงปริมาณน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ค่าความสามารถในการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบและค่าปริมาณน้ำอ่อนที่ถูกตรวจพบว่าค่าความกระด้างเกินมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1.1 ปริมาณน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐานต่อเดือน

ลำดับที่	ปริมาณน้ำอ่อน เกินมาตรฐาน (ลิตร)	ปริมาณน้ำอ่อนต่อ รอบเรซิ่น(ลบ.ม.)	Basic capacity (g as $CaCO_3$/l-resin)
1	4,870	1656	49.23
2	4,450	1601	47.60
3	3,746	1714	50.96
4	3,780	1723	51.22
5	4,461	1698	50.48
6	4,850	1688	50.18
7	4,730	1620	48.16
8	4,460	1621	48.19
9	5,670	1692	50.30
10	4,620	1680	49.95
11	3,631	1692	50.30
12	4,743	1731	51.46
13	4,320	1726	51.31
14	4,752	1711	50.87
15	3,467	1670	49.65
ค่าเฉลี่ย	**4,437 (SD = 560.07)**	**1,681 (SD = 39.53)**	**49.98 (SD = 1.17)**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่น
2. เพื่อลดปริมาณน้ำกระด้างที่เกินมาตรฐาน
3. เพื่อเพิ่มความสามารถพื้นฐานในการกำจัดความกระด้างของเรซิ่น (Basic capacity)
4. เพื่อหาสาเหตุและวิเคราะห์ปัญหาปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่น
5. เพื่อหาสาเหตุและวิเคราะห์ปัญหาน้ำกระด้างเกินมาตรฐาน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. พิจารณาข้อมูลก่อนการปรับปรุงของการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่นทั้งหมด 15 เดือน ตั้งแต่เดือน ม.ค. 61 ถึง มี.ค. 62

2. มาตรฐานของระบบน้ำอ่อนพิจารณาเฉพาะค่าความนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความกระด้างของน้ำ

3. ขอบเขตของน้ำอ่อนที่วิจัยเริ่มตั้งแต่ น้ำที่เข้าท่อระบบน้ำอ่อน จนถึงท่อน้ำขาเข้าของแผนกต้นกำลัง แผนกบรรจุขวด และหอผึ่งน้ำ

4. การวัดค่าใช้เครื่องมือเดิม และห้องทดลองเดิมของโรงงาน

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. สำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สำรวจพื้นที่โรงงานเพื่อหาปัญหา และเก็บข้อมูล
3. ทำการหาสาเหตุของปัญหา และระบุสาเหตุ
4. ปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ
5. ทดสอบระบบตามข้อกำหนด
6. ติดตามเพื่อยืนยันผล
7. สรุปผลวิจัยพร้อมข้อเสนอแนะ
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ช่วยลดปริมาณน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐาน
2. เพิ่มปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่น
3. ลดปริมาณงานของพนักงาน
4. ลดความผิดพลาดในการปฏิบัติงาน
5. เพิ่มความสามารถพื้นฐานในการกำจัดความกระด้างของเรซิ่น (Basic capacity)
6. แผนกอื่นสามารถเข้าถึงข้อมูลการผลิตน้ำอ่อนได้ง่าย

1.8 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ID	Task Name	Duration	Start	Finish	2018								2019				
					May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May
1	ศึกษาปัญหาของโรงงานตัวอย่าง	47 days	Mon 28/05/18	Tue 31/07/18													
2	เขียนข้อกำหนดทางเทคนิค	24 days	Mon 02/07/18	Tue 02/08/18													
3	สรรหาผู้รับจ้าง	22 days	Mon 01/08/18	Tue 30/08/18													
4	เริ่มงานโครงการปรับปรุงระบบ Softener	67 days	Mon 03/09/18	Tue 04/12/18													
5	ทดลองผลิตน้ำ	47 days	Mon 03/12/18	Tue 05/02/19													
6	ทดลองหา Parameter	22 days	Mon 04/02/19	Tue 05/03/19													
7	จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	64 days	Mon 04/03/19	Tue 30/05/19													

รูปที่ 1.5 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประเภทของแหล่งน้ำ

แหล่งน้ำในโลกนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. น้ำผิวดิน (Surface Water) ได้แก่ น้ำในแม่น้ำลำคลอง ห้วย และบึงต่างๆ น้ำประเภทนี้โดยทั่วไปจะมีสารแขวนลอย (Suspended Solids หรือ SS) สูง และสารละลาย (Dissolved Solids) ค่อนข้างต่ำ ยกเว้นแต่น้ำที่มีเกลือแร่สูง คุณภาพของน้ำในแม่น้ำลำคลองที่มีการไหลต่อเนื่องจะมีคุณภาพดีกว่าน้ำในบึงหนองหรือน้ำในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ เนื่องมาจากในบึงหนองหรืออ่างเก็บน้ำอาจจะมีการทิ้งน้ำเสียและการระบายน้ำเข้ามาและสะสมอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกลือแร่ต่างๆ มีปริมาณสูงขึ้นเรื่อยๆ น้ำประปาสำหรับชุมชนจะใช้แหล่งน้ำผิวดินเป็นหลัก

2. น้ำใต้ดิน (Ground Water) ได้แก่ น้ำบาดาล ซึ่งส่วนใหญ่จะค่อนข้างใส แทบจะไม่มีสารแขวนลอยแต่จะมีสารละลายสูงกว่าน้ำผิวดิน ขึ้นอยู่กับบริเวณของแหล่งน้ำ ในบางกรณีปริมาณสารละลายของน้ำบาดาลจะน้อยกว่าน้ำผิวดิน โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำ เนื่องจากน้ำประปามีปริมาณไม่เพียงพอ และบริการไม่ทั่วถึงโรงงาน ปัจจุบันระดับน้ำบาดาลในบริเวณภาคกลางได้ลดถอยต่ำลงไปมาก เนื่องจากมีการสูบขึ้นใช้อย่างมาก และการเติมน้ำลงใต้ดินโดยวิธีธรรมชาติมีไม่เพียงพอและไม่ทันต่อการใช้ กรมทรัพยากรธรณีกระทรวงอุตสาหกรรมได้ควบคุมการใช้น้ำบาดาลโดยการกำหนดให้ขออนุญาตก่อนการเจาะใช้บ่อน้ำบาดลและเก็บค่าน้ำตามปริมาณที่ใช้

3. น้ำกร่อย (Brackish Water) น้ำประเภทนี้อาจจะเป็นน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินก็ได้ น้ำกร่อยเป็นแหล่งน้ำที่อยู่ใกล้ทะเลตามชายฝั่งและตามเกาะต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำใต้ดิน ซึ่งน้ำทะเลได้ไหลเข้ามาผสมกับน้ำจืดใต้ดิน เป็นแหล่งน้ำที่สำคัญสำหรับเกาะและเมืองชายทะเล ความกร่อยของน้ำเกิดขึ้นจากมีเกลือคลอไรด์ (Chloride) ค่อนข้างสูง

4. ทะเล (Sea Water) เป็นแหล่งน้ำที่ใหญ่ที่สุด แต่มีการนำมาผลิตเป็นน้ำใช้น้อยที่สุด เนื่องจากใช้จ่ายในการผลิตสูง และต้องใช้เครื่องมือการผลิตที่มีราคาแพง เป็นแหล่งน้ำสำหรับสถานที่ขาดแคลนน้ำจืด เช่น ประเทศแถวตะวันออกกลาง แหล่งท่องเที่ยวตามเกาะต่างๆ ฐานเจาะน้ำมันกลางทะเลและเรือเดินข้ามมหาสมุทร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 ความกระด้างของน้ำ (Water Hardness)

ความกระด้างของน้ำเกิดจากธาตุโลหะที่อยู่ในสภาพไอออนที่มีประจุบวก เช่น แคลเซียมไอออน(Ca^{2+}) , แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เป็นต้น มีคุณสมบัติในการทำให้สบู่เกิดฟองยาก และทำให้เกิดตะกรันในหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งมีผลเสียทำให้น้ำเดือดช้า ถ้านำมาบริโภคอาจทำให้เกิดโรคนิ่วได้

น้ำกระด้างมี 2 ประเภทคือ

1. น้ำกระด้างชั่วคราว (Temporary hardness) หมายถึง น้ำกระด้างที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต โดยความกระด้างชั่วคราวจะหายไปเมื่อให้ความร้อน และจะตกตะกอนเป็นหินปูน

2. น้ำกระด้างถาวร (Permanent hardness) หรือน้ำกระด้างไม่เกิดคาร์บอเนต หมายถึง น้ำกระด้างที่เกิดจากสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมที่รวมตัวกับซัลเฟต (SO_4^{2-}) , คลอไรด์ (Cl^-) หรือไนเตรต (NO^{3-}) น้ำกระด้างถาวรไม่สามารถกำจัดโดยการให้ความร้อนได้ จะต้องใช้สารเคมีในการตกตะกอนและแยกตะกอนออก(วังไพศาล 2554)

2.3 สารปนเปื้อนในน้ำ

สารปนเปื้อนในน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทต่างๆ คือ

1) สารแขวนลอย เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ แบ่งเป็นชนิดย่อยๆ ได้อีกดังนี้

1.1 สารแขวนลอยและตกตะกอนได้ (Suspended and Settleable Solids) เป็นสารที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง และรวมตัวให้ตกตะกอนได้โดยการใช้สารเคมีและสามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยการกรองธรรมดา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 สารแขวนลอยและไม่ตกตะกอน (Colloidals) เป็นสารที่มีขนาดเล็กมาก และบางครั้งเป็นสารทีมีประจุบวกหรือลบ เช่น ดินเหนียวหรือดินโคลน ผลักดันกันเอง ทำให้แขวนลอยไม่ยอมตกตะกอน สามารถทำให้เกิดการรวมตัวกันตกตะกอนได้โดยการใช้เคมีทำลายประจุให้เป็นกลาง และสามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยการกรองธรรมดา

1.3 ความขุ่น (Turbidity) เป็นผลมาจากที่มีสารแขวนลอยอยู่ในน้ำ การวัดความขุ่นในปัจจุบันใช้วิธีการวัดความหักเห และการกระจัดกระจายของแสงที่ผ่านน้ำ มีหน่วยเป็น NTU (Nephlo-metric Turbidity Units) สามารถกำจัดด้วยการกรองธรรมดา

1.4 สี (Color) สีที่เกิดขึ้นในน้ำมีอยู่สองชนิด คือ สีที่เกิดขึ้นจากการมีสารแขวนลอย ซึ่งสามารถกำจัดได้ด้วยการกรองธรรมดา และสีที่เกิดขึ้นจากสารละลายในน้ำ ซึ่งสามารถกำจัดด้วยการ

กรองธรรมดา และสีที่เกิดขึ้นจากสารละลายในน้ำ ซึ่งต้องกำจัดโดยการดูดซึมด้วยถ่านกัมมันต์ และวิธีอื่นๆ เช่น การกรองด้วยแผ่นเมมเบรน

2) สารละลายน้ำ (Dissolved Solids) ซึ่งบางครั้งจะใช้คำว่า Total Dissolved Solids หรือ TDS ซึ่งมีอยู่หลายชนิด และส่วนมากจะละลายในสภาพของเกลือแร่ ในรูปของสารประจุบวกและประจุลบ ดังตัวอย่างของปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow Ca^{+2} + 2HCO_3^- \quad (2.1)$$

$$NaCl \longrightarrow Na^+ + Cl^- \quad (2.2)$$

$$MgSO_4 \longrightarrow Mg^{+2} + SO_4^{-2} \quad (2.3)$$

$$Fe(OH)_3 \longrightarrow Fe^{+3} + 3(OH)^- \quad (2.4)$$

2.1 ไบคาร์บอเนต (HCO_3) เป็นสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติเกิดขึ้นจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ละลายในน้ำ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของค่าแอลคาร์ไลนิตี้ (alkalinity) ของน้ำ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำเปลี่ยนค่า pH เร็วเกินไป

2.2 คลอไรด์ (Cl^-) เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี มีอยู่ตามน้ำธรรมชาติทั่วไป ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้น้ำมีรสกร่อยหรือเค็ม และจะทำให้ภาชนะบรรจุที่เป็นโลหะเกิดสนิมได้รวดเร็ว การกำจัด หรือลดปริมาณ คลอไรด์ออกจากน้ำค่อนข้างจะยุ่งยาก

2.3 ซัลเฟต (SO_4^{-2}) เป็นสารที่ไม่ค่อยจะละลายน้ำ มีอยู่ตามน้ำธรรมชาติ จะมีมากในน้ำใต้ดิน ถ้ารวมตัวกับแคลเซียมจะเกิดเป็นความกระด้างถาวรในน้ำ ซึ่งเมื่อเกิดตะกรันแล้วจะกำจัดได้ยากมาก

2.4 คาร์บอเนต (CO_3^{-2}) เป็นสารที่ไม่ค่อยละลายน้ำ มีอยู่ตามน้ำธรรมชาติโดยเฉพาะบริเวณที่มีหินปูน ถ้ารวมตัวกับแคลเซียมหรือแมกนีเซียม จะเกิดเป็นความกระด้างถาวรในน้ำ

2.5 ไฮดรอกไซด์ (OH^-) เป็นสารประจุลบของด่าง ปกติจะไม่มีอยู่ในน้ำธรรมชาติ เพราะจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับธาตุไฮโดรเจน แล้วกลายเป็นน้ำ ถ้ามีอยู่มากแสดงว่ามีการปนเปื้อนจากด่างโซดาไฟ หรือปูนขาว

2.6 ไนเตรต (NO_3^-) เป็นสารที่ละลายเข้าสู่น้ำจากไนโตรเจนในอากาศมากกว่าการละลายจากเกลือแร่ปกติจะมีปริมาณน้อย ถ้ามีมากแสดงว่าน้ำปนเปื้อนจากปุ๋ยกสิกรรมหรือน้ำเสียจากชุมชน ถ้ามีมากกว่า 40 มก./ลิตร ในน้ำดื่มจะเป็นอันตรายต่อการเลี้ยงทารก

2.7 ฟอสเฟต (PO_4^{-3}) ในน้ำธรรมชาติจะมีอยู่น้อย ถ้าหากมีปริมาณสูงแสดงว่าได้รับการปนเปื้อนจากปุ๋ยกสิกรรมหรือน้ำเสียอุสาหกรรมบางประเภท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8 โซเดียม (Na^{+}) เป็นธาตุที่ละลายน้ำได้สูงเช่นเดียวกับเกลือคลอไรด์ การกำจัดหรือลดปริมาณโซเดียมออกจากน้ำค่อนข้างยุ่งยาก

2.9 แคลเซียม (Ca^{+2}) เป็นธาตุที่ก่อให้เกิดความกระด้างในน้ำธรรมชาติ เกิดจากสารประเภทหินปูนละลายเข้าสู่แหล่งน้ำ ก่อให้เกิดปัญหาตะกรันเกาะติดตามท่อน้ำและระบบผลิตน้ำ

2.10 แมกนีเซียม (Mg^{+2}) เป็นธาตุที่ก่อให้เกิดความกระด้างในน้ำธรรมชาติเช่นเดียวกันกับแคลเซียม ความกระด้างในน้ำ 1 ใน 3 เกิดจากแมกนีเซียม และ 2 ใน 3 เกิดจากแคลเซียม

2.11 เหล็ก (Fe^{+3}) เป็นธาตุที่ละลายอยู่ในน้ำตามธรรมชาติ น้ำใต้ดินจะมีปริมาณมากกว่าน้ำผิวดิน การละลายน้ำจะอยู่ในรูปเหล็กเฟอรัส เมื่อผสมกับอากาศหรือออกซิเจน จะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นเหล็กเฟอริก

2.12 แมงกานีส (Mn^{+4}) เป็นธาตุที่ละลายน้ำตามธรรมชาติ โดยปกติจะมีอยู่เฉพาะในน้ำใต้ดิน ซึ่งจะละลายน้ำในรูปแมงกานัส เมื่อสัมผัสกับอากาศหรือออกซิเจนจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็น แมงกานิก ซึ่งไม่ละลายน้ำ และตกตะกอนมีสีดำ เป็นปัญหาของน้ำใต้ดิน เช่นเดียวกันกับเหล็ก

2.13 ซิลิก้า (SiO_2) เป็นสารละลายน้ำถ้าอยู่ในรูปของ จะละลายได้น้อยประมาณ 1-50 มก./ลิตร ถ้าอยู่ในรูปไบซิลิเกต จะละลายน้ำได้มากกว่า 50 มก./ลิตร ก่อปัญหาให้เกิดตะกรันในหม้อไอน้ำความดันสูงและตามท่อไอน้ำทั่วไป

2.14 สารละลายอื่นๆ โดยเฉพาะธาตุโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ทองแดง สารหนู ปรอท สังกะสี เป็นต้น เป็นธาตุที่ตามน้ำธรรมชาติแล้วจะมีอยู่น้อยมากหรือไม่มีเลย ถ้ามีปริมาณมากแสดงว่าน้ำได้รับการปนเปื้อนจากน้ำเสียอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) ก๊าซที่ละลายน้ำ (Dissolved Gases) ก๊าซที่ละลายน้ำและมีผลต่อคุณภาพน้ำใช้อุตสาหกรรมนั้นมี 3-4 ชนิด ได้แก่

3.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เมื่อละลายน้ำอาจจะอยู่ในรูปก๊าซ CO_2 ,กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) หรือเกลือไบคาร์บอเนต (HCO_3^{-}) จะมีผลต่อการเกิดสนิมในท่อเหล็ก หรือมีปัญหาเรื่องโฟมและการ carry-over ในไอน้ำ

3.2 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จะมีอยู่ในน้ำใต้ดินบางแห่ง ทำให้มีกลิ่นเหม็นไข่เน่า ในระบบไอน้ำจะกลายสภาพเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งกัดกร่อนโลหะต่างๆ

3.3 ก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็นก๊าซที่ละลายน้ำอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งสัตว์น้ำต้องใช้ในการหายใจดำรงชีวิต ก่อให้เกิดปัญหาสนิมในโลหะต่างๆ (ไพศาล วีรกิจ 2555)

2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน

สารแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในปัจจุบันเรซินเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบที่มีความสามารถแลก Na^+ ที่อยู่ในตัวกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำหลายชนิด เช่น Alkaline Earth Ions, NH_4^+ และไอออนที่มีประจุ 2+ บางตัว ซีโอไลต์มี 2 ชนิด คือ แบบธรรมชาติ และ แบบสังเคราะห์ ซีโอไลต์แบบธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ Green Sand หรือ Glauconite เป็น แร่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ พบมากในรัฐนิวเจอร์ซี สหรัฐอเมริกา แร่ชนิดนี้มีน้ำอยู่ประมาณ 10% ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์ได้มาจากสารประกอบหลายชนิดผสมกัน เช่น โซเดียมซิลิเคต และอะลูมินัมซัลเฟต หรือโซเดียมอะลูมิเนต ความถ่วงจำเพาะของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดเมื่อแห้งแล้วจะมีค่าประมาณ 2.1 ถึง 2.4 ซึ่งนับว่าต่ำกว่าของทรายธรรมดา (ถพ. 2.65) ไม่มากนัก ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์ มีน้ำอยู่ในตัวประมาณ 50% การที่มีน้ำอยู่ในตัวดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของซีโอไลต์แบบธรรมชาติและแบบสังเคราะห์ มีค่าประมาณ 100 และ 50 ถึง 70 ปอนด์ต่อลบ.ฟุต ตามลำดับ

เนื่องจากซีโอไลต์มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำจึงได้มีการพัฒนาสารอินทรีย์โพลีเมอร์จนกระทั่งสามารถใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน ที่มีอำนาจสูงกว่าซีโอไลต์เป็นอันมาก สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดใหม่นี้ เรียกว่า Resinous Ion Exchanger หรือ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และมีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากกว่าซีโอไลต์ ในปัจจุบัน วิศวกรใช้กรีนแซนด์ะ ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสเท่านั้น

1) หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน มี 2 ประการซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน คือ

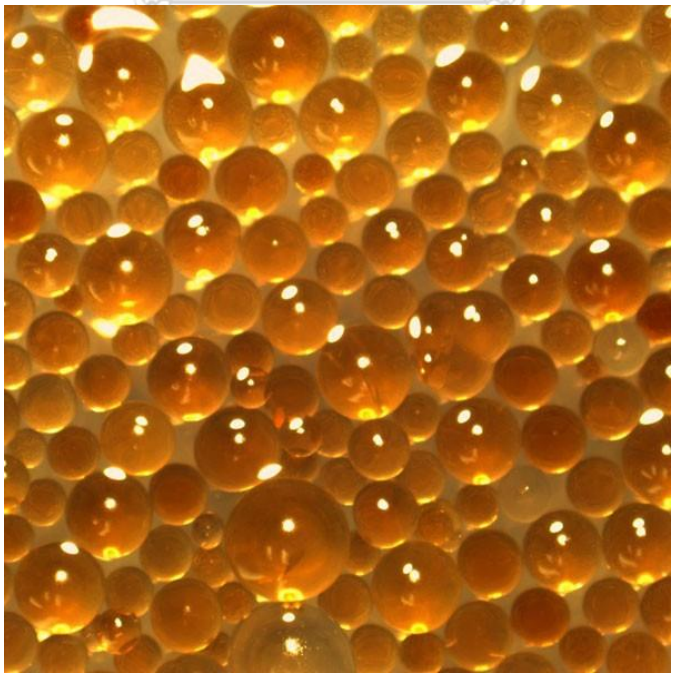
1.1 กำจัดไอออนต่าง ๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^-, Cl^- เป็นต้น นอกจากนี้ในบางครั้ง เรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่างๆ ออกจากน้ำได้ด้วย แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะพิษที่ใช้เรซินกำจัดออก ได้แก่ อาเซนิก,แบเรียม,แคดเมียม,โครเมียม,โคบอลต์,ทองแดง,ทอง,ตะกั่วโมลิบดีนัม,เซเลเนียม,เงิน,แวนนาเดียม,สังกะสี

1.2 ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากๆ งานส่วนนี้เกิดขึ้นหลังจากได้น้ำสะอาดแล้ว กล่าวคือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลาย จะหลุดออกมากับสารละลายรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration) เนื่องจากปริมาตรของสารละลายรีเจนเนอแรนต์ต่ำกว่าปริมาตรสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงมาก ลักษณะเช่นนี้เท่ากับเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมากมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายเท่า ระบบประปามักไม่สนใจหน้าที่ประการหลังนี้ เพราะสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงดังกล่าว ถือว่าเป็นของเสีย แต่ในบางกรณี เช่น ในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำ เราต้องการแยกไอออนออกจากสารละลายเจือจาง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ จึงต้องการทำให้ไอออนมีความเข้มข้นสูงมากๆ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนจึงมีประโยชน์มากในกรณีนี้

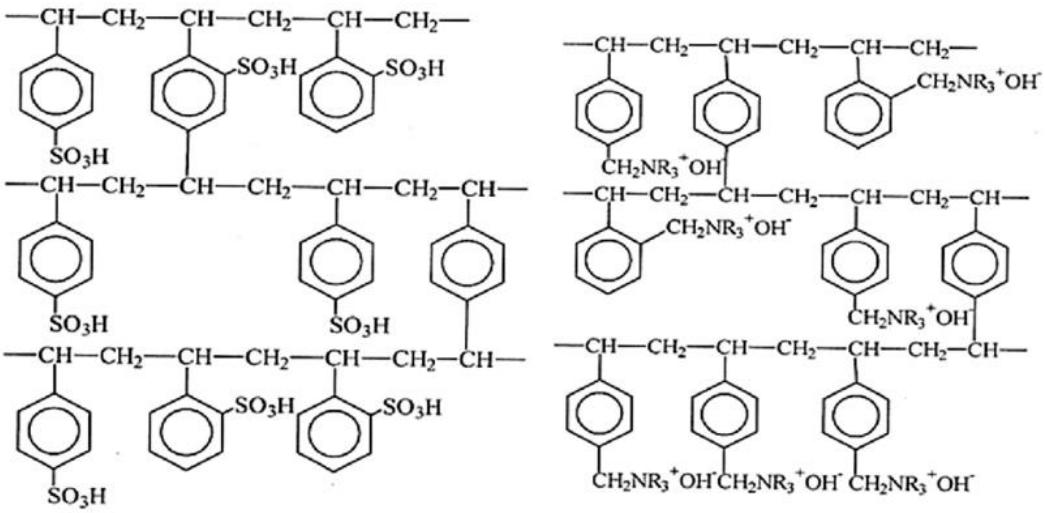
โดยปกติสารแลกเปลี่ยนไอออน มักออกแบบเพื่อกำจัดสารละลายที่อยู่ในรูปไอออนเท่านั้น และไม่ใช้ในการกรองคอลลอยด์หรือโมเลกุลขนาดใหญ่ที่อยู่ในรูปของไอออน (มีประจุ) อันที่จริงแล้ว สารแลกเปลี่ยนไอออนมีความเหมาะสมในการเป็นเครื่องกรองได้อย่างดี แต่ถ้าใช้กรองแล้วหน้าที่แลกเปลี่ยนได้อาจด้อย หรือสูญเสียประสิทธิภาพ แล้วแต่ว่าจะกรองมากหรือน้อย ถ้าหากภาระในการกรองอยู่ในระดับต่ำ สารแลกเปลี่ยนไอออนอาจทำหน้าที่ได้ทั้งสองอย่างพร้อมกัน การใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนให้ทำหน้าที่อื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าว เช่น สารแลกเปลี่ยนไอออนอาจใช้เป็นสารดูดเกาะผิว (Adsorbent) หรือเป็น คะตาลิสต์ (สารเร่งปฏิกิริยา) เป็นต้น มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย

2) โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน วิศวกรหรือผู้ใช้เรซินจึงควรต้องมีความเข้าใจถึงรายละเอียดบางประการเกี่ยวกับโครงสร้างของเรซิน คำว่า “เรซิน” หมายถึงเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ที่สังเคราะห์ ขึ้นมาใช้ในงานต่างๆ เรซินมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ โครงร่างที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า (Functional Group) โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างที่ปรากฏ ดังรูปที่ 2.1 และคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ ไม่แตกหักโดยง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นเส้นยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิดเป็นรูป 3 มิติ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ลักษณะเม็ดเรซิ่น

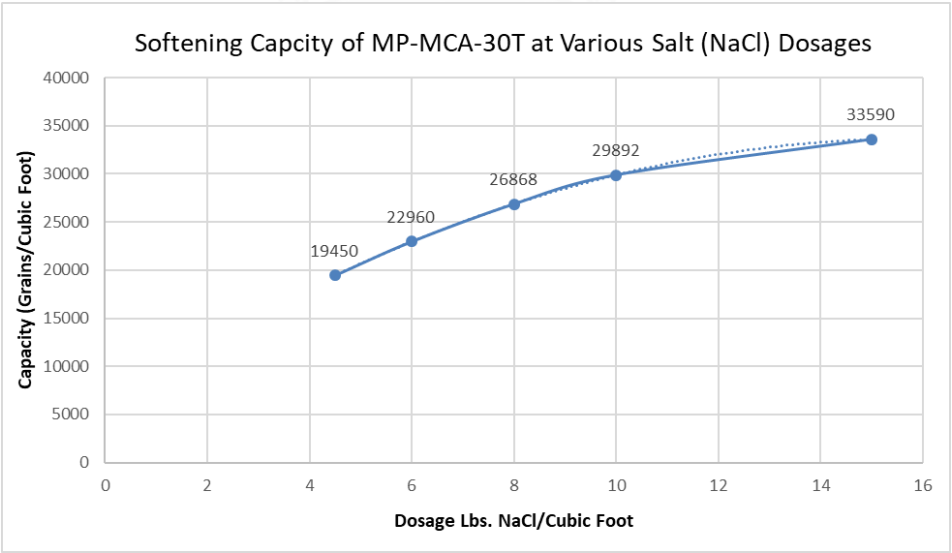


รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างเรซิ่น

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

1) อิทธิพลของปริมาณรีเจนเนอแรนต์ (หรือระดับรีเจนเนอเรชัน)

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำหนดอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน คือ ปริมาณรีเจนเนอแรนต์ที่ใช้ในการทำรีเจนเนอเรชั่น หน่วยที่ใช้คือปริมาณสารเคมี (ปอนด์หรือกรัม) ต่อปริมาตรของเรซิน (ลบ.ฟุตหรือลิตร) เช่น ปอนด์/ลบ.ฟุต หรือกรัม/ลิตร เป็นต้น ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณรีเจนเนอแรนต์กับอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน

แสดงให้เห็นถึงอำนาจแลกเปลี่ยน ไอออนที่คาดว่าจะได้จากการใช้รีเจนเนอแรนต์ในระดับต่างๆ เห็นได้ว่าการใช้รีเจนเนอแรนต์ปริมาณมากๆ จะได้อำนาจแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าการใช้ปริมาณน้อย แต่อัตราเพิ่มปริมาณรีเจนเนอแรนต์สูงกว่าอัตราการเพิ่มอำนาจแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดปริมาณรีเจนเนอแรนต์ไม่ให้สูงเกินไป ยกตัวอย่างเช่น ในการทำรีเจนเนอเรชั่นให้กับเรซินกำจัดความกระด้าง (SAR) มักใช้เกลือแกงประมาณ 6 ปอนด์/ลบ.ฟุต เป็นต้น

2) อิทธิพลของความเข้มข้นของรีเจนเนอแรนต์

ในการฟื้นอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนให้กลับคืนมาได้ดีที่สุด จำเป็นต้องมีระดับความเข้มข้นของรีเจนเนอแรนต์ที่เหมาะสม ยกตัวอย่าง เช่น สารละลายเกลือแกงควรมีความเข้มข้นประมาณ 10-15% จึงจะได้อำนาจแลกเปลี่ยนไอออนมากที่สุด การใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปทำให้เรซินหดตัวจนเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโซเดียมเข้าสู่ช่องว่างภายในเรซิน แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าความเข้มข้นของเกลือแกงต่ำเกินไป ก็จะมีปริมาณโซเดียมในขณะใดขณะหนึ่งไม่พอเพียงที่จะดึงแคลเซียมและแมกนีเซียมให้หลุดออกจากเรซินได้

3) อิทธิพลของเวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอแรนต์และเรซิน

เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอแรนต์กับเรซิน หมายถึง ระยะเวลาที่เรซินเริ่มได้สัมผัสกับรีเจนเนอแรนต์ ไปถึงเวลาที่เริ่มทำการชะล้าง (Rinse) สารรีเจนเนอแรนต์ เวลาสัมผัสอาจคำนวณได้จากสูตร ดังต่อไปนี้

$$\text{เวลาสัมผัส} = \frac{1}{\text{อัตราไหลของการทำรีเจนเนอเรชัน(อัตราการไหล / ปริมาตรเรซิน)}}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) อิทธิพลของความลึกของเรซิน

ความลึกของเรซิน มีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออนไม่มากเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในทางปฏิบัติ มักออกแบบให้ในเรซินมีความลึกไม่น้อยกว่า 24-30 นิ้ว

5) อิทธิพลของอัตราไหลของน้ำในระหว่างแลกเปลี่ยนไอออน

ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ดังเช่นในกรณีของเรซินแบบกรดแก่ที่กำจัดความกระด้าง อัตราไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินมีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เช่นถ้าอัตราไหลของน้ำสูงได้ถึง 10 กล./นาที-ลบ.ฟุต จะมีการสูญเสียอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเรซินบางชนิดมีอัตราแลกเปลี่ยนไอออนต่ำเป็นผลให้ต้องใช้อัตราไหลต่ำเพื่อให้มีเวลาพอเพียงสำหรับปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้น อัตราไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซิน จึงนิยมให้มี

ค่าอยู่ในช่วง 2-5 กล./นาที-ลบ.ฟุต (และอีกประการหนึ่งที่ไม่ใช้อัตราไหลสูงมาก ก็เพื่อมิให้มี Head Loss สูงเกินไป)

6) อิทธิพลของแร่ธาตุในน้ำดิบ

ความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำดิบมีอิทธิพลอย่างมากต่ออำนาจหรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าน้ำดิบมีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมต่อความกระด้าง [Na^+ /(Ca^{2+}+ Mg^{2+})] สูงกว่า 2:1 อำนาจในการกำจัดความกระด้างของเรซินจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจาก Na^+ จะแย่งตำแหน่งบนเรซินกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ดังนั้นแม้ว่าการกำจัดความกระด้างเกิดขึ้นได้แต่จะไม่สมบูรณ์ ทำให้มีการรั่วของความกระด้าง

2.5 การทำความสะอาดน้ำก่อนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินอันมีหน้าที่ในการกำจัดสารละลายน้ำที่อยู่ในรูปของไอออนต่างๆเท่านั้น ไม่ควรให้เรซินทำหน้าที่แทนสารกรองน้ำเป็นอันขาด น้ำที่ผ่านเข้าถังเรซินจึงควรเป็นน้ำใสที่มีความขุ่นหรือตะกอนแขวนลอยหรือก๊าซละลายน้ำหรือน้ำมัน ลอยอยู่น้อยที่สุด สารมลทินต่าง ๆ ดังกล่าว ทำให้อายุของเรซินสั้นกว่าที่ควรจะเป็น ในกรณีที่น้ำดิบได้มาจากแหล่งบาดาล การกรองน้ำก่อนเข้าถังเรซินอาจไม่จำเป็น เนื่องจากน้ำบาดาลมักปราศจากความขุ่น อย่างไรก็ตามถ้าน้ำบาดาลมีเหล็กอยู่ในระดับสูง ก็จำเป็นต้องกำจัดออกเสียก่อน มิฉะนั้นเหล็กอาจทำให้เรซินเสียจนใช้การไม่ได้ ในกรณีที่น้ำดิบได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินจะต้องกำจัดตะกอนแขวนลอยต่าง ๆ ออกจากน้ำด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น โคแอกกูเลชัน การตกตะกอน การกรอง เป็นต้น เสียก่อนจึงจะส่งน้ำผ่านเข้าถึงเรซินได้ คลอรีนหรือออกซิไดซิงเอเจนต์อื่นๆ ก็อาจทำลายเรซินบางชนิดได้ โดยเฉพาะประเภทกรดอ่อน หรือต่างอ่อน ทำให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

2.6 ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดสารละลายต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปไอออนได้ อย่างไรก็ตาม การแลกเปลี่ยนไอออนไม่เหมาะสำหรับสารละลาย (TDS) ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 700 มก./ล. เพราะเป็นวิธีที่ไม่ประหยัด วิธีที่เหมาะสมกว่ามากควรเป็น Reverse Osmosis หรือ Electrodialysis กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถใช้ทำความสะอาดน้ำ เพื่อกำจัดสารมลทินเฉพาะอย่างในน้ำได้ดังนี้ กำจัดความกระด้าง กำจัดความเป็นด่างไบคาร์บอเนต และกำจัดเกลือแร่ทุกชนิดเพื่อผลิตน้ำบริสุทธิ์(ตัณฑุลเวศม์ 2542)

2.7 ระบบควบคุมวงปิด (Closed Loop Control System)

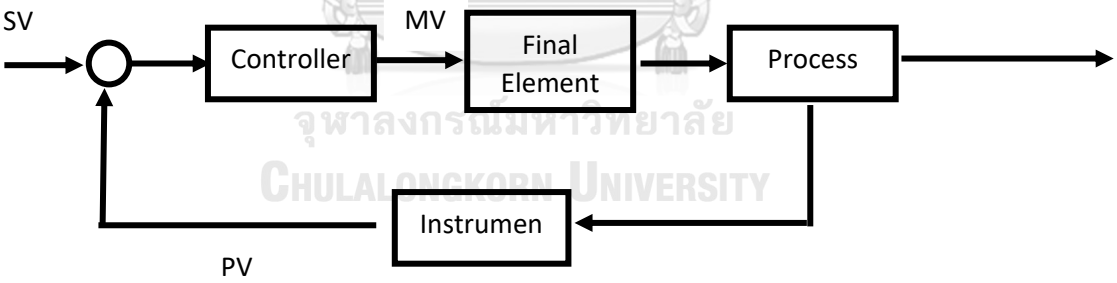
1) ระบบควบคุมวงปิด หมายถึง ระบบที่จัดการองค์ประกอบต่างๆให้สัมพันธ์กัน เพื่อปรับปรุงระบบให้ทำงานตามต้องการ โดยใช้สัญญาณเอาต์พุต มาคำนวณและควบคุมระบบ ประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

1.1 ตัวควบคุม (Controller) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานหรือขบวนการ โดยรับสัญญาณ analog หรือ digital แล้ว สัญญาณควบคุมไปที่ Final Element ตัวอย่างตัวควบคุมในปัจจุบัน เช่น PLC ,PID และ Arduino

1.2 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Element) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับ Process ให้เข้าใกล้ค่า SV (Set point value) ตัวอย่างเช่น Motor ,Inverter และ Control Valve

1.3 กระบวนการ (Process) หมายถึงระบบที่ต้องการจะวัดหรือควบคุมให้เป็นไปตามค่า SV (Set point value) ตัวอย่างเช่น การควบคุมอัตราการไหลของน้ำ การควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มไอน้ำ

1.4 เครื่องมือวัด (Instrument) หมายถึง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการวัดกระบวนการ และส่งผลย้อนกลับไปที่ Controller โดยส่งสัญญาณมาตรฐานออกมา ตัวอย่างเช่น Flow Transmitter,Temperature Transmitter ระบบควบคุมแบบวงปิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



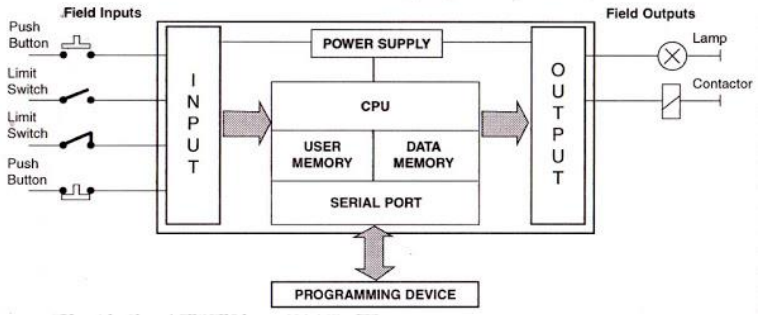
รูปที่ 2.4 แสดงระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop Control System)

2) PLC (Programmable Logic Controller) หมายถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์กระบวนการ หรือเครื่องจักรทางไฟฟ้าต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยวิธีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานหรือการเปลี่ยนแปลงโปรแกรมการทำงานได้ด้วยการโปรแกรมในหน่วยประมวลผลกลาง ซึ่งลำดับการทำงานจะเริ่มจากการรับสัญญาณอินพุต การประมวลผล และผ่านออกไปที่เอาต์พุต ซึ่งมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์ แต่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าใน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ฝุ่นละอองมาก ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และมีอายุการใช้งานได้ทนมากกว่า จนเรียกได้ว่าเป็น “คอมพิวเตอร์สำหรับอุตสาหกรรม”

เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ ดังนั้นจึงมีโครงสร้างคล้ายกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยอินพุต (Input Unit) หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) อุปกรณ์สำหรับป้อนโปรแกรม (Program device) หน่วยจ่ายพลังงาน (Power supply unit) และหน่วยเอาต์พุต (Output Unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยส่วนประกอบทั้งหมดนี้จะต้องทำงานสัมพันธ์กัน กล่าวคือต้องมีการสื่อสารกันผ่านบัส (Bus) อยู่ตลอดเวลาการทำงาน โดยแต่ละส่วนประกอบจะทำหน้าที่แตกต่างกันไปดังนี้



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ PLC

2.1 Field Input เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สำหรับตรวจจับพฤติกรรมต่างๆแล้วเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าทำให้หน่วยอินพุต (Input Unit) รับรู้ได้ ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณอนาลอกหรือดิจิตอล ตัวอย่างอุปกรณ์อินพุต เช่น Flow sensor, Push button, Temp sensor, Float switch เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.6 อุปกรณ์อินพุต (Field Input)

2.2 Input Unit เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณที่ได้รับมาจาก Field Input ซึ่งเป็นสัญญาณหลากหลายรูปแบบ เช่น 0-1 (ON-OFF), 4-20 mA ,0-5 VDC เป็นต้น แล้วทำการปรับแต่งสัญญาณเหล่านี้ให้เป็นสัญญาณที่หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) สามารถรับรู้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 Input Unit

2.3 หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit: CPU) หน่วยประมวลผลกลางจัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากที่สุดและเปรียบเสมือนสมองของ PLC มีหน้าที่ประมวลผล ตัดสินใจและควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบภายใต้คำสั่งเงื่อนไขที่เขียนไว้ในโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 หน่วยประมวลผล ของ PLC รุ่น s7-1200

2.4 หน่วยเอาต์พุต (Output Unit) มีหน้าที่รับสัญญาณที่ได้รับการประมวลผลแล้วจาก CPU จากนั้นจะทำการปรับแต่งระดับของสัญญาณให้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมกับอุปกรณ์เอาต์พุตที่ต้องการ เช่น สัญญาณดิจิตอลหรืออนาลอก โดยในส่วนนี้ต้องผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก ถ้า

อุปกรณ์เอาต์พุตเป็นสัญญาญแบบดิจิตัลอยู่แล้ว จะปรับแต่งสัญญาณให้มีค่าเหมาะสมเพื่อขับอุปกรณ์เอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 2.9

รูปที่ 2.9 หน่วยเอาต์พุต (Output Unit)

2.5 อุปกรณ์เอาต์พุต (Output Device) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่จะต้องระมัดระวังในการต่อใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากจะต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เอาต์พุตที่อาจจะเป็นสัญญาณอนาลอกหรือดิจิตัล เช่น หลอดไฟ มอเตอร์ โซลินอยด์ Control valve เป็นต้น (ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ 2556) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 อุปกรณ์เอาต์พุต (Output device)

2.8 ผังก้างปลา (fishbone diagram)

ผังแสดงเหตุและผล (ผังก้างปลา) คือ ผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวกัน รวบรวมไว้เป็นระบบในผังที่มีลักษณะคล้ายก้างปลา จึงมีชื่อเรียกว่า ผังก้างปลา (Fishbone diagram)

1) วัตถุประสงค์ของผังก้างปลา

1.1 ผังก้างปลาเป็นผังที่ช่วยในการระดมสมองและวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาในกระบวนการแก้ปัญหา

1.2 สาเหตุที่วิเคราะห์ได้จะถูกจำแนกตามสาเหตุใหญ่ ย่อย ลึก ลงไปเรื่อย ๆ ตามเหตุและผลที่มีความเกี่ยวข้องกันอย่างลึกซึ้งและเป็นระบบโดยรวบรวมไว้ในแผนผังที่มีลักษณะคล้ายก้างปลา

1.3 การกำหนดปัจจัยบนก้างปลา หลักการ 4M 1E เป็นกลุ่มปัจจัย (Factors) เพื่อจะนำไปสู่การแยกแยะสาเหตุต่าง ๆ

- Man คนงาน หรือพนักงาน หรือบุคลากร
- Machine เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก
- Material วัตถุดิบหรืออะไหล่ อุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการ
- Method กระบวนการทำงาน
- Environment อากาศ สถานที่ ความสว่าง และบรรยากาศการทำงาน

2) ชนิดของผังก้างปลา มี 3 ประเภท ได้แก่

2.1การวิเคราะห์ความผันแปร โดยจะใช้แสดงสาเหตุของการเกิดความผันแปร ในคุณภาพที่แสดงด้วยหัวปลา

2.2 การจำแนกตามกระบวนการผลิต ใช้สำหรับการแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุ และผลโดยโดยมีการจำแนกตามกระบวนการย่อยต่าง ๆ

2.3 การกำหนดรายการของสาเหตุ มีโครงสร้างเหมือนกรณีการวิเคราะห์ความผันแปร แต่จะมีความต่างกันตรงที่ว่า แผนภาพก้างปลาประเภทนี้จะมุ่งสู่สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา (ตามหัวปลา)

3) วิธีการสร้างผังก้างปลา

3.1 กำหนดหรือเขียนปัญหาที่หัวปลาทางด้านขวาของแผนภาพ ควรกำหนดให้ชัดเจน มีความเป็นไปได้ ซึ่งหากเรากำหนดประโยคปัญหานี้ไม่ชัดเจนตั้งแต่แรก จะทำให้ต้องใช้เวลามากในการค้นหาสาเหตุ และจะใช้เวลานานในการทำผังก้างปลา

3.2 เขียนสาเหตุหรือปัจจัยหลัก ๆ ซึ่งอาจมีหลายสาเหตุไว้ที่ปลายก้างปลาแต่ละก้าง โดยสาเหตุหรือปัจจัยนั้นสามารถที่จะช่วยให้เราแยกแยะและกำหนดสาเหตุต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ และเป็นเหตุเป็นผล ซึ่งสาเหตุหรือปัจจัยหลัก ๆ อาจเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับบริบทของปัญหา เช่น

- 4M 1E (Man Machine Material Method Environment)
- 4P (Place Procedure People Policy)
- 4S (Surrounding Supplier System Skill)

3.3 เขียนสาเหตุย่อยต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบในแต่ละสาเหตุหรือปัจจัยหลักไว้ที่ก้างปลาย่อยหากมีสาเหตุย่อย ๆ อีกก็จะเขียนไว้ที่ก้างปลาย่อยที่เกี่ยวข้อง โดยอาจใช้คำถามทำไม หลาย ๆ ครั้ง ในการเขียนแต่ละก้างปลาย่อย

3.4 เมื่อสิ้นสุดคำถามแล้ว จึงขยับไปที่ก้างต่อ ๆ ไป จนกว่าจะได้ผังก้างปลาที่สมบูรณ์

3.5 เมื่อทำผังก้างปลาเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะนำผังก้างปลาไปใช้ประโยชน์ต่อไป ควรตรวจทานดูว่าการเขียนเหตุผลบนผังมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยให้ทดลองอ่านจากก้างที่เล็กที่สุดไปยังก้างที่ใหญ่ที่สุดจนกระทั่งถึงหัวปลา

2.9 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

FMEA ย่อมาจากคำว่า Failure Mode and Effect Analysis หมายถึง การวิเคราะห์คุณลักษณะของความเสียหายและผลกระทบที่ตามมา ซึ่งปัจจุบันในหลายๆอุตสาหกรรมได้นำหลักการ FMEA ไปใช้ในการปรับปรุงวิธีการทำงาน ตั้งแต่ การออกแบบ การผลิตและการบริการ เป็นต้น

หลักการ FMEA ได้ถูกพัฒนาโดยหน่วยงานอากาศยานทางทหารของสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ทศวรรษที่ 60 จากนั้นได้มีการประยุกต์วิธีการ FMEA ไปยังบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ชั้นนำของโลก ได้แก่ Ford, GM และ Chrysler โดยเป็นข้อกำหนดที่สำคัญของระบบ QS-9000 และในปัจจุบันนี้วิธีการ FMEA ก็ได้กลายมาเป็นข้อกำหนดพื้นฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ผู้ผลิตรถยนต์ทุกค่าย ทุกยี่ห้อ หรือแม้แต่ผู้ผลิตชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ต้องปฏิบัติตาม ภายใต้ระบบคุณภาพ TS-16949

FMEA จะมุ่งเน้นที่การชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น (Potential Failure Mode) อันเนื่องมาจากการออกแบบ การผลิต หรือการบริการ จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Effects Analysis) และสุดท้ายก็เพื่อการนำไปสู่การหาวิธีป้องกันการเกิดความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Problems Prevention)

1) ประเภทของ FMEA สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1.1 Design FMEA (DFMEA) คือ การปรับปรุงการออกแบบโดยวิธีการ FMEA

1.2 Process FMEA (PFMEA) คือ การปรับปรุงการผลิตโดยวิธีการ FMEA

1.3 Servicr FMEA (SFMEA) คือ การปรับปรุงการบริการโดยวิธีการ FMEA

2) ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของการผลิตโดยหลักการ FMEA

2.1 กำหนดแผนผังการดำเนินงาน (Process Flow)

2.2 กำหนดหน้าที่หลักของ Product

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 วิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหาย (Failure Mode) ที่อาจจะเกิดขึ้นกับ Product

2.4 หาสาเหตุของการเกิดคุณลักษณะความเสียหาย (Cause of Failure Mode)

2.5 พิจารณาว่าลูกค้าจะรู้ได้อย่างไรถ้าเกิดความเสียหายต่อ Product

2.6 กำหนดระดับของความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้น (S=Severity) แสดงดังตารางที่ 2.1

2.7 พิจารณาถึงความถี่ของสาเหตุของการเกิดคุณลักษณะความเสียหาย (O=Occurrence of Cause of Failure Mode) แสดงดังตารางที่ 2.2

2.8 พิจารณาวิธีการในปัจจุบันที่ทำการตรวจสอบการเกิดคุณลักษณะความเสียหาย (D=Detectability of Cause of Failure Mode) แสดงดังตารางที่ 2.3

2.9 คำนวณค่า Risk Priority Number (RPN) = S×O×D

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ FMEA

ผลกระทบจากข้อบกพร่อง	ตัวอย่าง	ระดับ
เกิดอันตรายโดยไม่มีการเตือน	แผนกที่นำน้ำอ่อนไปใช้ เครื่องจักรเสีย และไม่มีการเตือนล่วงหน้า	10
เกิดอันตรายโดยมีการเตือน	แผนกที่นำน้ำอ่อนไปใช้ เครื่องจักรเสีย ใช้งานไม่ได้ โดยมีการเตือนล่วงหน้า	9
มีผลกระทบสูงมาก	100% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องรอน้ำอ่อนมากกว่า 2 ชั่วโมง	8
มีผลกระทบสูง	75% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องชะลอการผลิตระหว่าง 1 ถึง 2 ชั่วโมง	7
ผลกระทบปานกลาง	50% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องชะลอการผลิตระหว่าง 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง	6
ผลกระทบต่ำ	25% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องชะลอการผลิตไม่เกิน 30 นาที	5
ผลกระทบต่ำมาก	ผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ แต่เครื่องจักรทำงานหนักขึ้นมากกว่า 25%	4
เกือบไม่มีผลกระทบ	ผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ แต่เครื่องจักรทำงานหนักขึ้นระหว่าง 24 ถึง 15 %	3
เกือบไม่มีผลกระทบ	ผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ แต่เครื่องจักรทำงานหนักขึ้นจากเดิมไม่เกิน 14 %	2
ไม่มีผลกระทบ	ไม่มีผลกระทบใดๆ	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การประเมินโอกาสการเกิดขึ้น (O) สำหรับ FMEA

โอกาสในการเกิด	ตัวอย่าง	ลำดับคะแนน
สูงมาก	จำนวนครั้งที่พบปัญหามากกว่า 90 %	10
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 89.99 - 80 %	9
สูง	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 79.99 - 70 %	8
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 69.99 - 60 %	7
ปานกลาง	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 59.99 - 50 %	6
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 49.99 - 40 %	5
ต่ำ	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 39.99 - 30 %	4
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 29.99 - 20 %	3
ต่ำมาก	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 19.99 - 10 %	2
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาน้อยกว่า 9.99 %	1

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจ (D) สำหรับ FMEA

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจพบ			การควบคุมที่ใช้เพื่อให้ตรวจพบ	ลำดับคะแนน
		A	B	C		
แทบเป็นไปไม่ได้	ไม่สามารถตรวจพบได้			X	ไม่สามารถตรวจพบหรือไม่มีการตรวจ	10
เป็นไปได้ยากมาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบทางอ้อมหรือการสุ่มตรวจสอบ	9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจ (D) สำหรับ FMEA (ต่อ)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจพบ			ตัวอย่าง	ลำดับคะแนน
		A	B	C		
เป็นไปได้ยาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น	8
ต่ำมาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตา 2 ครั้งเท่านั้น	7
ต่ำ	การควบคุมจะตรวจพบได้		X	X	การควบคุมมีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด	6
ปานกลาง	การควบคุมจะตรวจพบได้		X		มีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดข้อบกพร่อง	5
ปานกลางถึงค่อนข้างสูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบปัญหาในกระบวนการย่อยต่างๆ ได้หรือใช้เครื่องมือตรวจสอบการตั้งค่าระบบตั้งแต่ครั้งแรก	4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจ (D) สำหรับ FMEA (ต่อ)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจพบ			การควบคุมที่ใช้เพื่อให้ตรวจพบ	ลำดับคะแนน
		A	B	C		
สูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบปัญหาในจุดปฏิบัติงาน หรือตรวจพบในหลายๆจุด	3
สูงมาก	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบปัญหาในจุดปฏิบัติงานโดยมีการใช้อุปกรณ์อัตโนมัติเข้าร่วม	2
สูงมาก	การควบคุมมีโอกาสแน่นอนที่จะตรวจพบ	X			ไม่สามารถตรวจสอบปัญหาได้เนื่องจากมีตัวป้องการความผิดพลาด	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) ข้อควรระวังในการค้นหาสาเหตุด้วย FMEA มักใช้ไม่ได้ผลนักกับการวิเคราะห์หาความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นจึงควรใช้เทคนิค FMEA วิเคราะห์ความล้มเหลวของเครื่องจักรและอุปกรณ์ร่วมกับใช้เทคนิคอื่นๆ ที่เหมาะสมกว่า เช่น Job safety analysis-JSA หรือ What if analysis เป็นต้น วิเคราะห์ หาความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องนำผลการปฏิบัติการผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานแสดงไว้ใน FMEA ด้วยเมื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวของเครื่องจักร/อุปกรณ์ เช่น พนักงานป้อนข้อมูลอุณหภูมิของเตาอบสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว

FMEA เป็นการวิเคราะห์จากล่างไปบนจึงทำให้การวิเคราะห์ความล้มเหลวที่เกิดจากการทำงานสัมพันธ์กันของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร/อุปกรณ์ หรือส่วนประกอบต่างๆ ของระบบย่อยไม่ได้ผลนักหรือไม่ชัดเจน ดังนั้นผู้วิเคราะห์ต้องเก็บข้อมูลความล้มเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้จากการทำงานสัมพันธ์กัน (interface) ของชิ้นส่วนต่างๆ ด้วยเสมอ

ผู้วิเคราะห์มักมีการวิเคราะห์สาเหตุเพียง 1 เหตุต่อ 1 ลักษณะความล้มเหลว/บกพร่อง ทำให้ลดโอกาสการมองเห็นต้นตอของลักษณะความล้มเหลว/บกพร่องที่อาจเกิดขึ้น รวมทั้งการระบุสาเหตุแห่งความล้มเหลว/บกพร่องมักระบุสาเหตุที่ไม่ชัดเจน เช่น พนักงานผิดพลาด, เครื่องจักรเสีย เป็นต้น โดยไม่ได้ลงรายละเอียดของความล้มเหลว/บกพร่องหรือ ต้นตอของสาเหตุ ทำให้การกำหนดมาตรการขจัดและลดอันตรายหรือผลที่เกิดตามมาไม่ชัดเจนด้วย ดังนั้นผู้วิเคราะห์จำเป็นอย่างยิ่งในการนำหลัก 5 why โดยการถาม ทำไม อย่างน้อย 5 ครั้งมาช่วย

4) จุดแข็งและจุดอ่อนของเทคนิค FMEA

จุดแข็ง คือ ขั้นตอนการจัดทำเทคนิค FMEA ไม่ยุ่งยากซับซ้อนสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งงานความปลอดภัยและงานคุณภาพการผลิต เป็นเทคนิคที่นำไปสู่การขจัดและลดอันตรายในระยะยาวและการป้องกันไม่ให้เกิดความไม่ปลอดภัยหรือข้อบกพร่องได้ตั้งแต่ก่อนเริ่มการผลิต เพราะผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงสาเหตุต้นตอของการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงานกับเครื่องจักรและอุปกรณ์

จุดอ่อน คือ การนำไปประยุกต์ใช้ค่อนข้างจำกัดเพราะเน้นการวิเคราะห์เฉพาะรูปแบบความล้มเหลวของเครื่องจักรและอุปกรณ์มากกว่าการวิเคราะห์ความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน เป็นเทคนิคที่ต้องอาศัยข้อมูลด้านวิศวกรรมค่อนข้างมากเพื่อให้ทราบการทำงานของแต่ละชิ้นส่วนของเครื่องจักรและอุปกรณ์ รวมทั้งต้องทราบความสัมพันธ์ของแต่ละชิ้นส่วน เทคนิค FMEA นี้หากผู้วิเคราะห์มีความรู้และประสบการณ์ไม่เพียงพออาจไม่สามารถมองเห็นรูปแบบความล้มเหลวที่เกิดจากการทำงานสัมพันธ์กันของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น การที่เทคนิคนี้เน้นความล้มเหลวที่ชิ้นส่วนของเครื่องจักรทีละชิ้น ทำให้อาจมองไม่เห็นรูปแบบความล้มเหลวที่เกิดจากปัจจัยอื่น เช่น กระบวนการที่เปลี่ยนแปลงวัตถุดิบหรือเกิดจากปัจจัยภายนอกที่มองไม่เห็นรวมทั้งเกิดผลกระทบที่เกิดจากสาเหตุที่เป็นเหตุการณ์ที่เกิดร่วมกัน (co-incident) เทคนิคนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ออก เป็นต้น เช่น ท่อส่งแก๊สรั่วในบริเวณที่มี Hot Work หรือประกายไฟก็จะทำให้เกิดเพลิงไหม้ เป็นต้น (มัณยานนท์ 2550)

2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลอง คือ การออกแบบแผนการทดลองเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล และเพื่อตรวจสอบว่าของตัวแปรที่ศึกษาเข้ามามีผลกระทบต่อค่าตัวแปรตอบสนองอย่างไร

1) ประเภทของการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

1.1 การออกแบบการทดลองแบบ One-Factor-at-a-Time (OFAT) วิธีนี้เป็นการทดสอบทีละปัจจัย โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนค่าปัจจัยใดๆ เพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น และคงค่าของปัจจัยอื่นๆ ที่สนใจศึกษาพร้อมกันไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง ดังนั้นจะสามารถสรุปผลได้เพียงทีละปัจจัย แต่ไม่สามารถสรุปผลของปัจจัยอื่นๆ ที่ถูกคงค่าไว้ได้ ด้วยรูปแบบของ OFAT จะพบว่าทำให้ไม่สามารถศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ และวิธีนี้จะใช้จำนวนการทดลองและขนาดตัวอย่างมากกว่าการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE)

1.2 การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE) วิธีนี้เป็นการทดสอบที่สามารถให้เห็นผลของปัจจัยใดๆ ที่ระดับของปัจจัยอื่นๆอย่างน้อยสองระดับ ซึ่งทำให้สามารถศึกษาถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษาได้ ซึ่งแตกต่างกับวิธีการของ OFAT ที่ไม่สามารถศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ และวิธี DOE ใช้จำนวนการทดลองและ ขนาดตัวอย่างน้อยกว่าวิธีการแบบ OFAT

2) ประเภทของแบบการทดลองแบบ DOE

2.1 ประเภทที่ 1 เป็นแบบการทดลองที่ใช้สำหรับหาว่าปัจจัยใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นแบบการทดลองที่มีการทดสอบแต่ละปัจจัยที่สองระดับเท่านั้น เพื่อประหยัดจำนวนการทดลอง แบบการทดลองในประเภทนี้ได้แก่ แบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial design) และแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial design) เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 ประเภทที่ 2 เป็นแบบการทดลองที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ แต่ละปัจจัยต้องถูกทดสอบที่มากกว่า 2 ระดับ แบบการทดลองในประเภทนี้ได้แก่ แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design:CCD) และแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เป็นต้น

3) ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ระบุวัตถุประสงค์ของการทำาการทดลอง ได้แก่ การกำหนดตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่จะศึกษาและกำหนดว่าจะศึกษาเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย หรือจะศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

3.2 ออกแบบการทดลอง

1. กำหนดแบบการทดลองที่จะใช้ โดยพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาว่าต้องการศึกษาเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย หรือจะศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ซึ่งจะใช้แบบการทดลองที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้นนอกจากนั้นการกำหนดแบบการทดลองที่จะใช้ยังต้องพิจารณาจากจำนวนปัจจัย จำนวนของครั้งการทดลองที่สามารถทำได้ และคุณภาพของผลสรุปที่จะได้จากแบบการทดลองอีกด้วย

2. เขียนเมทริกซ์การออกแบบ

3. กำหนดค่าของแต่ละระดับของปัจจัยที่จะทำการทดสอบ

4. กำหนดตัวแปรอื่นๆ ที่อาจจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำการควบคุมตัวแปรเหล่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงตัวแปรรบกวน

5. ทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้ โดยต้องคำนึงถึงหลักสำคัญในการทดลอง ได้แก่ การทดลองซ้ำ การสุ่ม และการบล็อก ระหว่างการทดลองควรมีการเฝ้าระวัง (Monitoring) กระบวนการเพื่อให้มั่นใจว่าสามารถกำหนดค่าของตัวแปรในการทดลองตามระดับที่กำหนดและวางแผนไว้อย่างถูกต้อง

4) วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ตรวจสอบสมมติฐานว่าข้อมูลมีลักษณะที่เหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ การวิเคราะห์ความถดถอย (Analysis of Variance: ANOVA) หรือการทดสอบแบบ t ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยได้หรือไม่ โดยการวิเคราะห์ค่าเรซิดวล (Residuals) ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดหรือค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าส่วนตกค้างระหว่างค่าที่สังเกตได้กับค่าฟิตหรือค่าที่ประมาณได้จากสมการความสัมพันธ์

4.2 พิจารณากราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและกราฟผลกระทบหลักของปัจจัยว่า ปัจจัยนำเข้ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองในทิศทางใด

4.3 คำนวณค่าผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและผลกระทบหลักของปัจจัย

4.4 ทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบของปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (hypothesis testing)

4.5 วิเคราะห์ส่วนตกค้าง และปรับปรุงแบบจำลอง เพื่อตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ก่อนนำไปประยุกต์ใช้ควรทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริงในสถานที่และสภาพวะการทำงานจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำนายจากแบบจำลองหรือไม่ ซึ่งในความจริงค่าทั้งสองจะมีความแตกต่างกัน เรียกว่า“ค่าส่วนค้าง” (Residuals) โดยค่าส่วนค้างใช้แสดงความผันแปร (Variation) ที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง การตรวจสอบความเหมาะสมและความพอเพียงของแบบจำลองสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิเคราะห์ส่วนค้าง (Residual Analysis) ตรวจสอบกราฟส่วนค้างกับตัวแปรอิสระอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการได้แก่ ค่าทำนาย ลำดับการทดลองหรือเวลา และตัวแปรอิสระอื่นๆ โดยกราฟส่วนค้างไม่ควรมีรูปแบบใดๆ(Patterns) และมีการกระจายตัวแบบสุ่ม (Random Patterns)

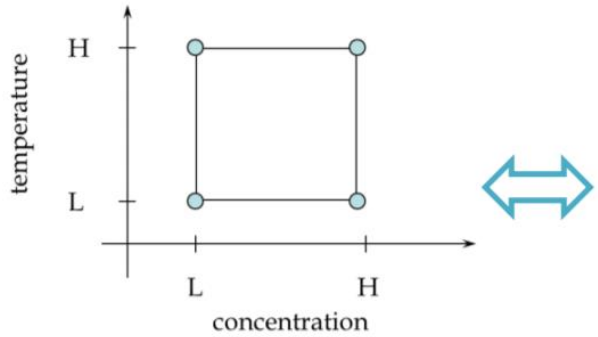
4.6 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเทอมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญและตัวแปรตอบสนอง

4.7 หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization technique)

4.8 สรุปผลการทดลอง และให้ข้อแนะนำที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งหลังสรุปและจัดทำข้อเสนอและแล้วควรทำการทดลองยืนยันผล (Confirmation Testing) เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้อง และเพื่อความต่อเนื่องควรกำหนดเป็นขั้นตอนมาตรฐานในการปฏิบัติงานและจัดทำระบบควบคุมการทำงานขึ้นมาด้วย

2.8 การทดลองแฟกเทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สองระดับ

การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปกรณีปัจจัยที่สองระดับ คือแบบการทดลองที่ประกอบไปด้วยทุกคอมบิเนชัน (Combination) ของระดับของปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยจะถูกทดลองที่สองระดับ ที่ค่าที่ระดับสูง (+1 หรือ high: H) และระดับต่ า (-1 หรือ low: L) รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปกรณีมีสองปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยถูกทดสอบที่สองระดับ พิจารณากรณีศึกษาที่มีปัจจัยที่ทดสอบสองปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิ (temperature: T) และความเข้มข้น (concentration: C) ตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาได้แก่ อัตราผลิตผลดี(yield: y) เมื่อจัดทุกคอมบิเนชันของสองระดับของสองปัจจัยแล้ว จะได้ว่าแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปจะประกอบไปด้วย 4 สภาวะการทดลอง ดังแสดงในเมทริกซ์การออกแบบในตารางที่ 2.4



Runs	Coded Values
L, L	-1,-1
L, H	-1, 1
H, L	1,-1
H, H	1, 1

รูปที่ 2.11 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลกรณีสองปัจจัยที่สองระดับ

ตารางที่ 2.4 เมทริกซ์การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสองปัจจัยที่สองระดับ

Run	T	C	Yield(%)
1	-	-	60
2	-	+	54
3	+	-	72
4	+	+	68

ในกรณีที่สามารถทำการทดลองซ้ำได้สำหรับสภาวะการทดลองใดๆ จะเกิดประโยชน์ในแง่ที่จะสามารถทำให้ทราบถึงระดับความผิดพลาดอย่างสุ่ม (random error) ได้ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่าง เมทริกซ์การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสองปัจจัยที่สองระดับ ซึ่งมีการทดลองซ้ำสองครั้งและมีลำดับแบบมาตรฐาน

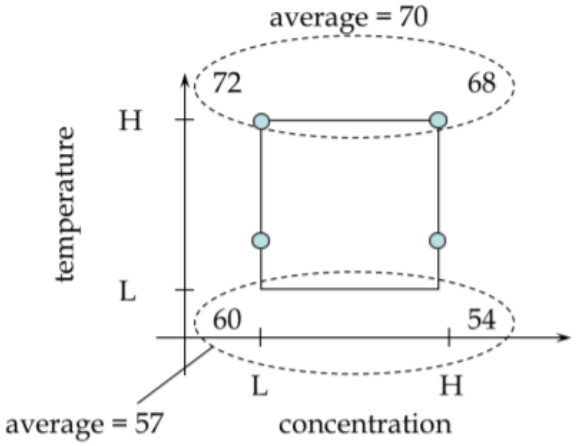
ตารางที่ 2.5 เมทริกซ์การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสองปัจจัยที่สองระดับ กรณีทำซ้ำ 2 ครั้ง

Run	T	C	Yield(%)
1	-	-	60
2	-	-	62
3	-	+	54
4	-	+	53
5	+	-	72
6	+	-	74
7	+	+	68
8	+	+	69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทำการทดลองตามลำดับมาตรฐานมีข้อเสียว่า อาจเกิดผลที่ปะปนกันระหว่างผลของปัจจัยที่ศึกษาและผลจากตัวแปรรบกวนได้ เช่น ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิในเตาต่ำในช่วงเช้า และทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิในเตาสูงในช่วงบ่าย ผลของอุณหภูมิในเตาที่มีต่ออัตราผลิตผลดีอาจมีผลปะปนกับผลของอุณหภูมิในอากาศ ซึ่งในช่วงเช้าจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าในช่วงบ่าย โดยหากทดสอบแล้วพบว่าผลของอุณหภูมิในเตามีผลต่ออัตราผลิตผลดีจริงๆ อาจเป็นไปได้ว่ามีผลของอุณหภูมิในอากาศร่วมด้วย เพื่อกำจัดผลของตัวแปรรบกวน จึงควรจัดให้ลำดับการทดลองเป็นไปอย่างสุ่ม ซึ่งจะเฉลี่ยผลของตัวแปรรบกวนไป ไม่ให้ปะปนอย่างมากกับปัจจัยที่ต้องการทดสอบ

ผลกระทบหลักของปัจจัยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.12 ซึ่งมีการแสดงค่าตัวแปรตอบสนองที่สภาวะการทดลองทั้งสี่สภาวะ

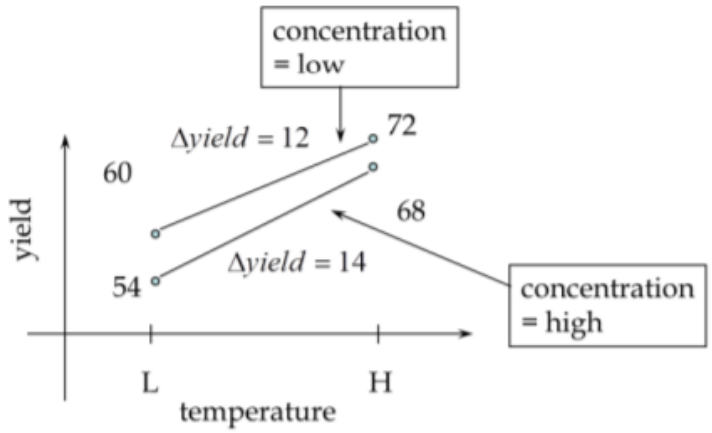


รูปที่ 2.12 ค่าตัวแปรตอบสนองที่สภาวะการทดลองทั้ง 4 สภาวะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราผลิตผลดีที่อุณหภูมิระดับสูงมีค่าเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์และค่าเฉลี่ยของอัตราผลิตผลดีที่อุณหภูมิระดับต่ำมีค่าเท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คำนวณค่าผลกระทบหลักของอุณหภูมิได้เป็น 70 – 57 = 13 เปอร์เซ็นต์ซึ่งหมายความว่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไประดับสูง จะทำให้อัตราผลิตผลดีเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 13 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของผลกระทบหลักของความเข้มข้น พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราผลิตผลดีที่ความเข้มข้นระดับสูงมีค่าเท่ากับ 61 เปอร์เซ็นต์และค่าเฉลี่ยของอัตราผลิตผลดีที่ความเข้มข้นระดับต่ำมีค่าเท่ากับ 66 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คำนวณค่าผลกระทบหลักของความเข้มข้นได้เป็น 61 – 66 = -5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งหมายความว่า เมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไประดับสูง จะทำให้อัตราผลิตผลดีเปลี่ยนแปลงลดลง 5 เปอร์เซ็นต์

ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นอยู่ที่ระดับต่ำ และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบให้อัตราผลิตผลดีเพิ่มขึ้น 12 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อความเข้มข้นอยู่ที่ระดับสูง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบให้อัตราผลิตผลดีเพิ่มขึ้นถึง 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าแตกต่างกัน เมื่อใช้ความเข้มข้นที่ระดับต่างกัน แสดงว่ามีผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยทั้งสอง ทั้งนี้ควรทำการทดสอบทางสถิติเพื่อพิสูจน์ว่าผลกระทบร่วมนี้มีนัยสำคัญหรือไม่ต่อไป



รูปที่ 2.13 แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

2.9 การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Designs; CCD)

การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Designs ; CCD) เป็นรูปแบบการทดลองที่เหมาะสำหรับใช้ในการศึกษา หรือสร้างตัวแบบในลักษณะของโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second-order or Quadratic Model) จากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าแผนการทดลองนี้จะมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่น ๆ ที่ใช้ศึกษาตัวแบบโพลิโนเมียลดีกรี 2 แบบแผนการทดลอง CCD มีข้อดีหลายประการ

1. เหมาะที่สุดในการศึกษาสมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second-order mode) ในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factor)

2. มี ความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง เนื่องจากมีค่าความละเอียด (Resolution) ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ (2^k Full Factorial) และการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial)

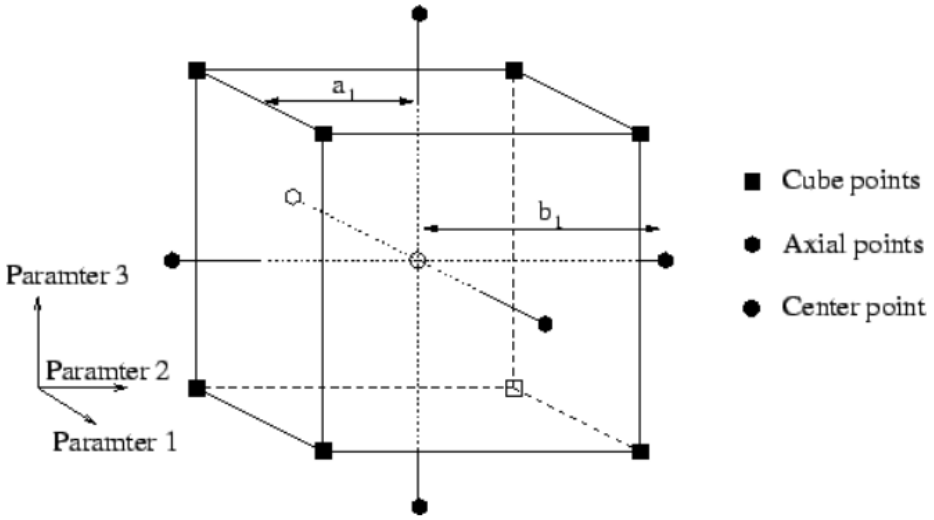
3. โครงสร้างซ้ำซ้อนสำหรับ Resolution III หรือ IV สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับ 2^{k-p}

แผนการทดลอง CCD คือสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ ดังนั้นในกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factor) จะต้องปรับ แผนการทดลองโดยเฉพาะกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพมากกวา่ 1 ปัจจัย จำเป็นต้องใช้การทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน หรือ การออกแบบ D-Optimal การทดลองแบบ CCD นี้จึงเป็นแผนการทดลองที่ดีที่สุดในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณที่ 3 ระดับ โดยแสดงแผนการทดลองดังรางที่ 2.6 และรูปที่ 2.14

ตารางที่ 2.6 แผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง กรณีมี 3 ปัจจัย

ชนิดการออกแบบการทดลอง	ลำดับเงื่อนไขการทดลอง	ปัจจัยในการทดลอง		
		X_1	X_2	X_3
Factorial Point (F)	1	-1	-1	-1
	2	-1	-1	+1
	3	-1	+1	-1
	4	-1	+1	+1
	5	+1	-1	-1
	6	+1	-1	+1
	7	+1	+1	-1
	8	+1	+1	+1
Center Point (C)	9	0	0	0
	10	0	0	0
	11	0	0	0
	12	0	0	0
	13	0	0	0
	14	0	0	0
Axial Points (A) กำหนด α = 1.682	15	$-\alpha$	0	0
	16	$+\alpha$	0	0
	17	0	$-\alpha$	0
	18	0	$+\alpha$	0
	19	0	0	$-\alpha$
	20	0	0	$+\alpha$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟการทดลองแบบส่วนประสมกลาง กรณีมี 3 ปัจจัย

2.10 การทดลองแบบ Box- Behnken (Box-Behnken Designs)

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3-level design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแบบเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factors) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น ฯลฯ ลักษณะของการออกแบบวิธี Box - Behnken (Box-Behnken Designs) จะใช้หลักการของ 2^2 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Points) รวมเข้าไป Box - Behnken Designs มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ 3^k กาวทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป โดยที่ k คือ จำนวนปัจจัย Box และ Behnken ได้จัดทำตารางสำหรับแผนการทดลองเพื่อใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย (ไม่รวมกรณี k = 8) ตัวอย่างของแผนการทดลอง ของ Box และ Behnken แสดงดังตารางที่ 2.7 และ 2.8 สำหรับกรณีที่จำนวนปัจจัย (k) เท่ากับ 4 ตารางที่ 8 เขียนในรูปแบบย่อ แผนการทดลองจะจัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (Blocks) แต่ละกลุ่ม ประกอบด้วย 9 การทดลอง ± หมายถึง (- - + + และ - + - +)

ตารางที่ 2.7 รูปแบบย่อของแผนการทดลอง Box – Behnken กรณี 4 ปัจจัย

ปัจจัย			
A	B	C	D
±1	±1	0	0
0	0	±1	±1
±1	0	0	0
0	±1	±1	0
0	0	0	0
±1	0	±1	0
0	±1	0	±1
0	0	0	0

ในกรณี 4 ปัจจัยจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 27 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 2.8 แผนการทดลอง Box – Behnken กรณี 4 ปัจจัย

Run	A	B	C	D
1	-	-	0	0
2	-	+	0	0
3	+	-	0	0
4	+	+	0	0
5	0	0	-	-
6	0	0	-	+
7	0	0	+	-
8	0	0	+	+
9	0	0	0	0
10	-	0	0	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

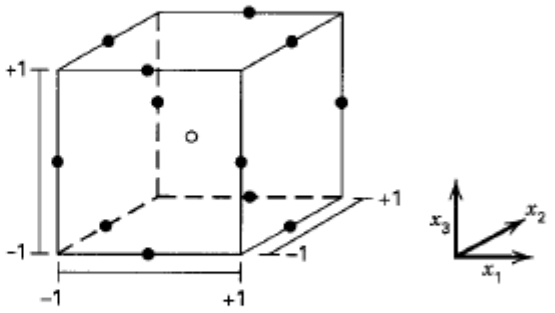
ตารางที่ 2.8 แผนการทดลอง Box – Behnken กรณี 4 ปัจจัย (ต่อ)

Run	A	B	C	D
11	-	0	0	+
12	+	0	0	-
13	+	0	0	+
14	0	-	-	0
15	0	+	+	0
16	0	-	-	0
17	0	+	+	0
18	0	0	0	0
19	-	-	-	0
20	-	+	+	0
21	+	-	-	0
22	+	+	+	0
23	0	0	0	-
24	0	0	0	+
25	0	0	0	-
26	0	0	0	+
27	0	0	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จะเห็นได้ว่าจากแผนการทดลอง Box – Behnken ไม่ได้พิจารณาจุดมุม (Corner points) ซึ่งอาจจะต้องนำมาใช้พิจารณาในบางกรณี อย่างไรก็ตามผู้ทดลองบางส่วนอาจจะมองว่า การที่แผนการทดลองนี้ไม่พิจารณาจุดมุมเป็นข้อที่น่าสนใจ แต่บางกลุ่มอาจมองว่าเป็นข้อด้อย สามารถแสดงดังรูปที่ 2.15

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 2.15 รูปแบบเรขาคณิตของแผนการทดลอง Box – Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

Box-Behnken Design มีลักษณะเกือบจะเป็น Orthogonal (จำนวนการทดลองแต่ละ combination ทำในจำนวนครั้งที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะจุด Center points ข้อดีคือมีค่า Resolution เท่ากับ IV ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบในเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Inter-actions) แต่มีข้อเสีย คือ จำนวนครั้งที่ทดลอง (Number of Runs) มีค่ามากและไม่สามารถที่จะลดได้ ไม่ว่าผู้ศึกษาจะสนใจผลกระทบที่เกินกว่าผลกระทบเชิงเส้น หรือไม่ (Box-Behnken Design สามารถประมาณผลกระทบในรูปโพลิโนเมียลกำลังสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้เสมอ) นอกจากนี้แผนการทดลองนี้จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามีจำนวนมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป

2.11 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

เนื่องจากการเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์โดยการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นไม่มีหลักฐานการทดสอบทางสถิติที่ชัดเจนสนับสนุนในการสรุปผล การวิเคราะห์ผลจากข้อมูลตัวอย่างทำได้แค่เพียงการประมาณค่าแบบจุด (Point Estimation) เท่านั้น ซึ่งค่าสถิติที่ประมาณได้ดังที่ทราบโดยทั่วไปแล้วว่าเป็นตัวแปรสุ่ม (มีความแปรปรวน) และมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มได้ การทดสอบสมมติฐานถือเป็นกระบวนการทางสถิติที่เป็นทางเลือกหนึ่งในการสรุปข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะ

ทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ของระบบ หรือค่าพารามิเตอร์ที่สนใจของประชากรเพื่อให้ประโยชน์ในทางวิศวกรรม ตามวัตถุประสงค์ที่สนใจศึกษา ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีสุ่มตัวอย่างเพียงหนึ่งชุด (One Sample) มักทำโดยมีวัตถุประสงค์ในการสรุปข้อความเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ค่าที่ชี้บ่ง ตำแหน่งของกระบวนการ (μ; Mean) และค่าที่ใช้บอกการกระจายหรือความแตกต่างในระบบ (Variance) เพื่อประโยชน์ในการทราบถึงสภาพปัจจุบันของระบบหรือเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานข้อกำหนด (Specification) เช่น ข้อกำหนดระบว่าชิ้นงานที่ผลิตต้องทนแรงดึงไม่ต่ำกว่า 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ทำการสุ่มตัวอย่างมาขนาด 20 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ย จากตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 208 psi ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.74 psi จะสรุปได้หรือไม่ ว่ากระบวนการผลิตที่มีสอดคล้องกับมาตรฐาน เป็นต้น

2. กรณีสุ่มตัวอย่างสองชุด (Two Samples) ผู้เก็บข้อมูลโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบว่าข้อมูลจากสองแหล่งที่แตกต่างกัน หรือเงื่อนไขการผลิตที่ต่างกัน มีลักษณะที่เหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งโดยทั่วไปก็ยังคงทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ผลต่างของค่าเฉลี่ย ($\mu_1 - \mu_2$) เพื่อพิจารณาว่าตำแหน่งระบบแตกต่างกันหรือไม่ ($\mu_1 - \mu_2 = 0$) และอัตราส่วนของความแปรปรวน ($\boldsymbol{\sigma}^2_1/\boldsymbol{\sigma}^2_2$) เพื่อพิจารณาว่าความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ ($\boldsymbol{\sigma}^2_1/\boldsymbol{\sigma}^2_2 = 1$) เนื่องจากในทางทฤษฎีทางสถิติ การแจกแจงของตัวทดสอบที่อธิบายค่าสถิติของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถระบุได้

การพิจารณาผลต่างของค่าเฉลี่ย จะทำให้ผู้วิเคราะห์ทราบถึงความแตกต่างในตำแหน่งของระบบ กล่าวคือ ถ้าสามารถสรุปได้ว่าผลต่างของค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์จะสรุปได้ว่า $\mu_1 = \mu_2$ ถ้าผลต่างของค่าเฉลี่ยมากกว่าศูนย์ จะสรุปได้ว่า $\mu_1 > \mu_2$ และถ้าสรุปจากการทดสอบพบว่า ค่าผลต่างของค่าเฉลี่ยต่ำกว่าศูนย์ จะสรุปได้ว่า $\mu_1 < \mu_2$ ในทำนองเดียวกัน ในการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวน ถ้าพบว่าอัตราส่วนของความแปรปรวนจากการทดสอบสมมติฐานมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าระบบทั้งสองมีการกระจายที่ไม่แตกต่างกัน แต่ถ้าผลการทดสอบระบุว่า $\boldsymbol{\sigma}^2_1 > \boldsymbol{\sigma}^2_2$ แสดงว่าระบบที่ 1 มีความแตกต่างกันของข้อมูลมากกว่าระบบที่ 2 เป็นต้น ประโยชน์ของการเปรียบเทียบในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองหรืออันใดอันหนึ่งมีค่าแตกต่างกัน จะทำให้ผู้ศึกษาหรือผู้ทดลองสามารถระบุทางเลือกหรือเงื่อนไขทางเลือกที่เหมาะสมในทางปฏิบัติได้ ในกรณีที่ค่าไม่มีความแตกต่างกันเลย ก็ยังคงกลับไป พิจารณาได้ว่า ค่าพารามิเตอร์นั้นเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7.7.1 หลักการการทดสอบสมมติฐาน (Principles of Hypothesis Testing)

การอนุมานทางสถิติ (Inference Statistics or Inferential Statistics) คือ การสรุปข้อความเกี่ยวกับพารามิเตอร์ (ลักษณะที่แท้จริงของระบบ /กระบวนการ/ ประชากร) ที่สนใจศึกษา วิธีการทดสอบสมมติฐานจัดว่าเป็นศาสตร์พื้นฐานของวิชาการอนุมานอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และการประมาณค่า แบบช่วง (Interval Estimation) เป็นต้น ซึ่งในกรณีสุดท้ายคือ การประมาณค่าแบบช่วงจัดได้ว่ามี ความสัมพันธ์โดยตรงกับการทดสอบสมมติฐานและอาจระบุได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้แทนกันได้โดยตรง

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) คือ การทดสอบเพื่อสรุปหรือพิสูจน์ข้อความซึ่งเป็นข้อสมมติเกี่ยวกับระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษาว่า เป็นไปตามที่คาดคะเนไว้หรือไม่ เช่น ต้องการพิสูจน์ว่ารถยนต์ที่ผลิตขึ้นมากินน้ำมันน้อยหรือวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ยมากกว่า 12 กิโลเมตรต่อลิตร ซึ่งเป็นการพิสูจน์ตำแหน่งของค่ากลาง (μ) โดตั้งใจจะชี้ให้เห็นว่า $\mu > 12$ ในการทดสอบสมมติฐานนั้น จะแบ่งข้อสมมติเป็นสองส่วนหลักเรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) และสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรอง (Alternate or Alternative Hypothesis)

สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis; H_0) ประกอบด้วยข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าเท็จ (Disprove) หรือข้อความที่ต้องการปฏิเสธ ข้อความที่ระบุในสมมติฐานหลักจะเป็นบทกลับหรือส่วนกลับของสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรองเสมอ

สมมติฐานอื่น (Alternate Hypothesis; H_a หรือ H_1) ประกอบด้วยข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการจะพิสูจน์ว่าจริง (Prove) หรือต้องการยอมรับ ยกเว้นกรณีที่พิสูจน์ว่าเท่ากัน เครื่องหมายเท่ากับจะปรากฏในสมมติฐานหลัก เนื่องจาก วิธีการในการทดสอบจะต้องทำการกำหนดระดับการทดสอบ (Significance Level หรือ Type Error, α) จึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ใน H_0 ตามนิยามของค่า α (อยุธยา 2551)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธิดารัตน์ (2558) จากการศึกษาเรื่อง การลดเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุเป็นการนำแนวคิดซิกซ์ซิกมา มาดำเนินงาน พบว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมคือ อัตราเร็วในการล้างช้าที่ถังเรซินประจุบวกและประจุลบ 0.15 และ 0.10 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ ผลการปรับปรุงกระบวนการพบว่าระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินมีระยะเวลาลดลง 85% จาก 150 นาทีลดเหลือ 23 นาที สามารถเพิ่มการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้เพิ่มขึ้น 10,780 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน (ธิดารัตน์ ธัญญรักษ์ 2558)

รณชัย (2553) จากการศึกษาเรื่อง การลดของเสียจากการอบยางในกระบวนการผลิตยางรถยนต์โดยใช้เทคนิค FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) งานวิจัยนี้ลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบสำหรับการผลิต ผลการดำเนินการพบว่าการอบยางมีของเสียก่อนการปรับปรุง RPN มากกว่า 100 เท่ากับ 12 ตัว หลังการปรับปรุง RPN (Risk Priority Number) มากกว่า 100 เท่ากับ 5 ตัว เปอร์เซนต์ของเสียก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 2.88% หลังปรับปรุงเท่ากับ 1.29% (รณชัย ไม้สนธิ์ 2553)

ภูมิชูพงษ์ (2555) จากการศึกษาเรื่อง การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์(พีเอซี)กับค่าความขุ่น ใช้การทดลองจาร์เทสต์ (Jar Test) เพื่อหาปริมาณของพีเอซีที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำปลอดเกลือแร่และหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพีเอซีกับความขุ่นและค่า pH เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยต้นทุนในการผลิตน้ำปลอดเกลือแร่ของพีเอซีและโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลง 69.9% และ 86.0% ตามลำดับ ต้นทุนโดยรวมของสารเคมีในการผลิตน้ำปลอดเกลือแร่หนึ่งลูกบาศก์เมตรลดลง 27.5% หรือประมาณ 66,000 บาทต่อปี (ภูมิชูพงษ์ พูลสุวรรณ 2555)

ประคอง (2560) จากการศึกษาเรื่องการปรับปรุงกระบวนการผลิตธนบัตรโดยการลดของเสีย 2 ชนิด คือ หมึกส่วนเกิน และการเกิดซับหลัง โดยศึกษาจากกระบวนการผลิตหมึกพิมพ์ และกระบวนการพิมพ์เส้นนูนในสภาพปัจจุบัน แล้วทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการ (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) เพื่อนำมาประเมินค่าลำดับคะแนนความเสี่ยง (Risk Priority Number : RPN) โดยเลือกค่า RPN ที่มากกว่า 60 ขึ้นไป พบว่าสามารถ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปรับปรุงกระบวนการผลิตได้ดีขึ้น หมึกส่วนเกินของเสียลดลงจากเดิม 77% และการเกิดซับหลังลดลงจากเดิม 59% (ประคอง คำนวณดี 2560)

อรรถรัตน์ (2549) จากการศึกษาเรื่องกระบวนการผลิตและของเสียที่เกิดขึ้นในแผนกตกแต่งและเผาผลิตภัณฑ์ โดยใช้แผนผังก้างปลาในการค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อข้อบกพร่อง และใช้เทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) และให้ทีมผู้เชี่ยวชาญคำนวณค่าคะแนนความเสี่ยง (RPN) โดยเลือกการแก้ไขข้อบกพร่องที่มีค่า RPN มากกว่า 100 คะแนนขึ้นไป ผลการดำเนินการแก้ไข พบว่าเปอร์เซ็นต์ของเสียของกระบวนการผลิตรวมลดลงจาก 16.80 % เหลือ 7.78 % , เปอร์เซ็นต์ของเสียของกระบวนการตกแต่งลดลงจาก 9.63% เหลือ 4.44% และเปอร์เซ็นต์ของเสียของกระบวนการเผาลดลงจาก 6.23 % เหลือ 2.98 % (บุญเกตุ 2549)

สุรกิจ (2550) จากการศึกษาวิเคราะห์เพื่อลดของเสียของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนมาตรวัดแรงดัน โดยใช้การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านคุณภาพ (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) พบว่าของเสียส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการฉีด , กระบวนการทำเกลียว , กระบวนการเซาะขอบด้านใน , กระบวนการ Trimming จากนั้นให้ทีมผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์เพื่อประเมินค่าความรุนแรงของข้อบกพร่อง และโอกาสการตรวจพบข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต เพื่อคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยง ผลดำเนินงาน พบว่าเปอร์เซ็นต์ของเสียของกระบวนการฉีดลดลงจาก 12.63 % เป็น 1.71 % , เปอร์เซ็นต์ของเสียของกระบวนการทำเกลียวลดลงจาก 11.24 % เป็น 1.78 % และเปอร์เซ็นต์ของเสียของกระบวนการ Trimmingลดลงจาก 4.66 % เป็น 2.31 % (มัณยานนท์ 2550)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สมนึก (2538) จากการศึกษาการบำบัดน้ำที่ออกจากกระบวนการสลัดจ์กัมมันต์ เพื่อให้ได้คุณภาพของน้ำเติมหอทำน้ำเย็น โดยทำการพัฒนาวิธีบำบัดขั้นสูงของน้ำที่ออกจากกระบวนการสลัดจ์กัมมันต์ ระบบบำบัดน้ำประกอบด้วย การกรองด้วยวัสดุเม็ด 2 ชนิด การแลกเปลี่ยนไอออน และเบรคพ้อยต์คลอรีเนชัน จากผลการวิจัยพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับหน่วยปฏิบัติการแต่ละหน่วยเป็นดังนี้ ชั้นทรายซึ่งมีความสูง 20 เซนติเมตร และชั้นแอนทราไซด์ซึ่งมีความสูง 40 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเข้าควรเป็น 20 ลูกบาศก์เมตร / ตารางเมตร – ชั่วโมง เงื่อนไขการแลกเปลี่ยนไอออน คือ ชั้นเรซิน Duolite C20 ซึ่งมีความสูง 90 เซนติเมตร ควรมีอัตราการไหลของน้ำเข้า 10 ลูกบาศก์เมตร / ตารางเมตร – ชั่วโมง ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่า น้ำที่ออกจากระบบดังกล่าวมีคุณภาพเหมาะต่อการเติมหอทำน้ำเย็น (สมนึก จารุดิลกกุล 2538)

ศิวพร (2560) จากการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการควบคุมคุณภาพ ของการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น (Flexible Printed Circuit Board, FPCB) รุ่น 7-Flex เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่ถูกตรวจพบ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์รูปแบบของความเสียหาย และผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) ผลการวิจัยพบว่า ทำให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนของเสีย (Defective rate) ลดลงจากร้อยละ 6.08 เป็น 1.01 และค่าเฉลี่ยสัดส่วนการปฏิเสธล็อท (Lot Reject Rate, LRR) ลดลงจากร้อยละ 4.78 เป็น 2.10 นอกจากนี้ยังประหยัดค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปกับการทิ้งงานได้กว่า 40,000,000 บาทต่อเดือน (ศิวพร กระแสผล 2560)

พรศักดิ์ (2539) จากการศึกษาวิธีการลดต้นทุนบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชโดยใช้วิธีทางชีววิทยา คือ การเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสีย คือ ระบบตะกอนเร่ง (Activeatd Sludge) โดยผลทำให้ลดต้นทุนแปรผันจาก 62.29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เหลือ 13.18 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และทำให้ต้นทุนรวมลดลงจาก 85.50 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เหลือ 56.24 บาทต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนั้นยังได้มีการศึกษาถึงวิธีการควบคุมต้นทุนให้อยู่ในระดับต่ำ โดยใช้วิธีการควบคุมงาน (พรศักดิ์ ทวีมหาเกียรติ 2539)

ปิยะพร (2550) จากการศึกษาวิเคราะห์และควบคุมปริมาณโลหะมีค่าในการผลิตเครื่องประดับโดยใช้เทคนิค FMEA ทำการศึกษาตั้งแต่ การคำนวณน้ำหนักโลหะสำหรับหล่อตัวเรือน การแต่งตัวเรือน การฝังอัญมณีบนตัวเรือน ตลอดจนถึงการขัดเงาตัวเรือน พบว่าลักษณะข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการควบคุมปริมาณโลหะ ได้แก่ การขาดการจัดการเพื่อควบคุมโลหะมีค่าในกระบวนการผลิต ข้อมูลที่มียังไม่ถูกต้อง และขาดการจัดเก็บข้อมูลที่จำเป็นต่อการควบคุมโลหะมีค่า ผลการปรับปรุงแก้ไขพบว่า เปอร์เซ็นต์ความสูญเสียโลหะมีค่าแผนกหล่อตัวเรือนในเดือนเมษายนเท่ากับ 0.19 % ลดลงเหลือ 0.17 % แผนกแต่งตัวเรือนลดลงจาก 2.84 % เป็น 1.94 % แผนกขัดตัวเรือนจาก 0.76 % ลดลงเหลือ 0.72 % และค่าคะแนนความเสี่ยงชี้นำหลังการแก้ไขปรับปรุง พบว่ามีค่าลดลงโดยเฉลี่ย 80.17 % เมื่อเทียบกับคะแนนก่อนปรับปรุง (โลวะกิจ 2550)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

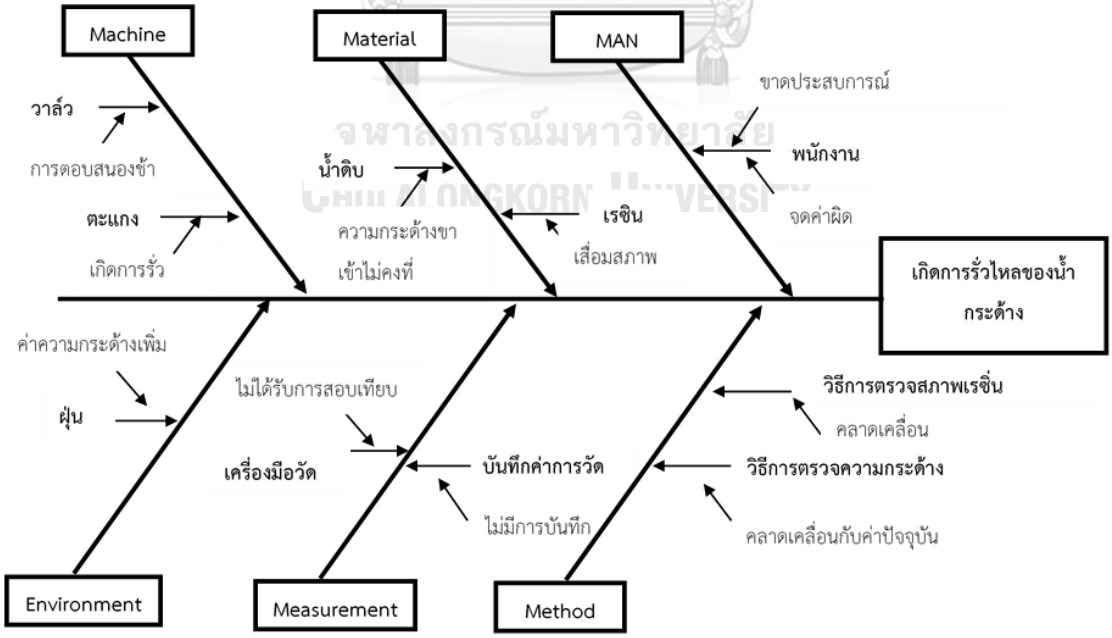
บทที่ 3
การหาสาเหตุและวิเคราะห์ข้อบกพร่อง

ในบทนี้แสดงการหาสาเหตุและวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพของน้ำ ผู้วิจัยได้ทำการประชุมในแผนกปรับปรุงระบบน้ำ เพื่อตั้งสมมติฐานของสาเหตุจากการระดมสมอง และทำการประเมินความเสี่ยงโดยใช้เทคนิค FMEA

3.1 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการรั่วไหลของน้ำกระด้าง

จากการศึกษาพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับปริมาณน้ำต่อรอบการผลิตน้อยสามารถจัดกลุ่มลักษณะข้อบกพร่อง คือ ปริมาณน้ำอ่อนในการผลิตต่อรอบน้อย และการรั่วไหลของน้ำกระด้างเกินมาตรฐาน

จากการประชุมของทีมงานแผนกปรับปรุงระบบน้ำ เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นโดยนำเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลามาใช้ เพื่อจำแนกสาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องออกเป็นหัวข้อต่างๆดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์ปัญหาการรั่วไหลของน้ำกระด้าง

3.1.1 การหาสาเหตุของข้อบกพร่องการรั่วไหลของน้ำกระด้าง

1) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Machine

- วาล์วตอบสนองช้า วาล์วที่หมุนด้วยมือ (Manual valve) เป็นวาล์วขนาดใหญ่ เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะมีความฝืด ทำให้การหมุนวาล์วแต่ละครั้งใช้เวลานานเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเข้ามาทำให้น้ำกระด้างที่เกินมาตรฐานเมื่อเรซิ่นเสื่อมสภาพแล้ว แต่มีการปิดที่ช้าทำให้เกิดการรั่วไหลของน้ำกระด้าง

- ตะแกงรั่ว ตะแกง (strainer) มีหน้าที่กันเม็ดเรซิ่นไม่ให้ไหลไปกับน้ำอ่อน ถ้าเกิดการรั่วก็จะทำให้เม็ดเรซิ่นหลุดไปกับน้ำอ่อน และทำให้ปริมาณเรซิ่นในถังลดลง ส่งผลให้การตรวจจับน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐานมีค่าผิดเพี้ยนไปจากเดิม

2) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Material

- ความกระด้างขาเข้าของน้ำไม่คงที่ ถ้าความกระด้างขาเข้ามีค่าคงที่ตลอด จะให้การคาดคะเนความเสื่อมสภาพของเรซิ่น มีความแม่นยำมากขึ้น แต่เนื่องจากความกระด้างมีค่าไม่คงที่เป็นผลให้บางรอบเรซิ่นมีการเสื่อมสภาพช้าเร็วแตกต่างกันไป พนักงานที่ตรวจสภาพเรซิ่นก็จะเกิดความผิดพลาดปล่อยเรซิ่นให้เสื่อมสภาพได้

- เรซิ่นเสื่อมสภาพ เรซิ่นเสื่อมสภาพเมื่อใช้ไปได้ 2-5 ปีขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เมื่อเรซิ่นมีการเสื่อมสภาพถาวรและมีการฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแล้ว การใช้งานก็จะไม่มีประสิทธิภาพเท่าเดิม ทำให้เกิดการรั่วไหลของน้ำกระด้างได้

3) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Man

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- พนักงานขาดประสบการณ์ ทักษะในการผลิตน้ำมีผลโดยตรงกับการเกิดการรั่วไหลของน้ำกระด้าง เนื่องจากการผลิตทุกขั้นตอนเป็นระบบที่ใช้คนเป็นหลัก (Manual) รวมถึงการตรวจสอบสภาพเรซิ่นก็ใช้สายตากับประสบการณ์พนักงาน ฉะนั้นถ้าพนักงานไม่มีทักษะ การตัดสินใจที่ผิดพลาดก็มีผลทำให้ความกระด้างของน้ำรั่วไหล เช่น การกำหนดอัตราการไหล การผสมความเข้มข้นของเกลือหรือการตรวจสภาพเรซิ่น เป็นต้น

- พนักงานจดค่าผิด การฟื้นฟูเรซิ่นจะใช้การนับปริมาณน้ำที่ผลิตได้ เมื่อครบจำนวนรอบเรซิ่นก็จะมีการตรวจวัดค่าความกระด้างเพื่อยืนยันว่าเรซิ่นเสื่อมสภาพ แต่ปริมาณน้ำพนักงานจะใช้การจดทุกชั่วโมง ถ้ามีการจดผิดก็จะทำให้การคาดคะเนสภาพเรซิ่นเสื่อมผิดพลาด เป็นผลให้เกิดการรั่วไหลของน้ำกระด้าง

4) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Environment

- ฝุ่นในโรงงานมีอนุภาคขนาดเล็ก หรือสิ่งแปลกปลอมเมื่อตกไปในบ่อพักน้ำอาจทำให้ค่าความกระด้างหรือค่าปริมาณของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ (Total Dissolved Solids:TDS) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการคาดคะเนความเสื่อมสภาพเรซิ่นผิดเพี้ยนได้

5) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Measurement

- เครื่องมือวัดมีความเก่าและไม่ได้รับการสอบเทียบ อันเนื่องมาจากไม่มีการวางแผนซ่อมบำรุง (Preventive Maintenance) ทำให้การอ่านค่าผิดเพี้ยน ประกอบกับเครื่องมือไม่ได้อ่านค่าเป็นดิจิตอล แต่ใช้สเกลทำให้เกิดความผิดพลาดของพนักงาน (Human Error) ได้

- ไม่มีการบันทึกค่า ค่าปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตต่อรอบมีความสำคัญต่อการพยากรณ์การเสื่อมสภาพเรซิ่นทั้งแบบถาวรและชั่วคราว เพื่อวางแผนการเปลี่ยนเรซิ่นหรือการฟื้นฟูสภาพได้ทันที และกันปัญหาเรซิ่นจะเสื่อมสภาพแต่ไม่ทราบรั่วหน้าได้

6) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Method

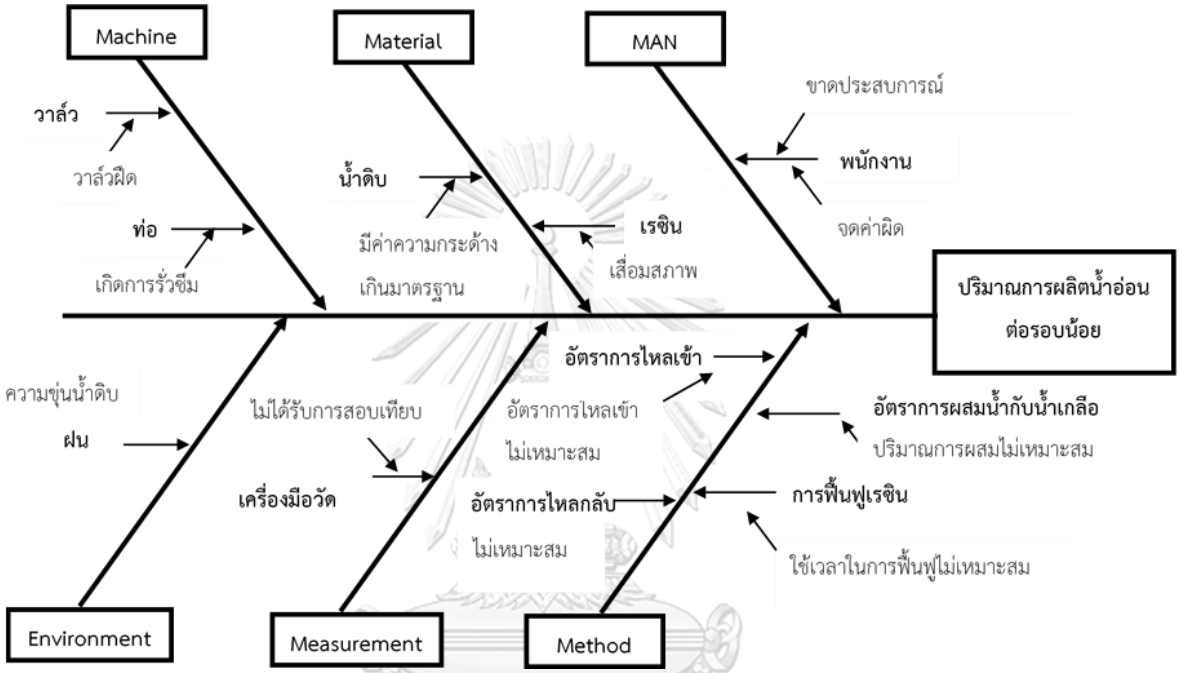
- การตรวจสภาพเรซิ่นมีความคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากการตรวจสภาพเรซิ่นปัจจุบันใช้วิธีการหยดสารทดสอบ แล้วใช้การเทียบสี ซึ่งอาจเกิดการผิดพลาดในการตัดสินใจได้

- การตรวจวัดค่าความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน ในการตรวจวัด พนักงานจะเปิดวาล์วที่ต่อออกมาจากท่อจ่ายน้ำเพื่อนำน้ำตัวอย่างมาทดสอบ ในขณะเดียวกันระบบก็ยังมีการจ่ายน้ำอยู่ ค่าที่ได้ก็จะไม่ใช่ค่าปัจจุบัน ทำให้เกิดการรั่วไหลของความกระด้างได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่นมีปริมาณน้อย

ในการพิจารณาปัญหาปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบได้น้อย ผู้วิจัยได้ระดมความคิดกับทีมผู้เชี่ยวชาญหารากของสาเหตุปัญหา เพื่อสามารถแก้ปัญหาที่ต้นเหตุได้ โดยใช้แผนผังก้างปลาแยกตามหัวข้อ 5M1E ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์ปัญหาปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.1 การหาสาเหตุของข้อบกพร่องปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบได้น้อย

1) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Machine

- วาล์วฝืด วาล์วที่เปิดปิดโดยพนักงาน (Manual valve) มีความฝืดเมื่อใช้ไปสักระยะเนื่องจากสนิม การเปิดปิดไม่สามารถทำได้ทันที ทำให้เสียเวลาในการผลิตน้ำอ่อนมากขึ้น

- ท่อรั่วซึม ปัจจุบันระบบท่อของโรงงานตัวอย่าง ไม่มีการตรวจสอบแรงดันน้ำต้นทางและปลายทางทำให้ไม่ทราบว่าท่อน้ำรั่วหรือท่อน้ำอุดตันหรือไม่ ซึ่งท่อรั่วจะทำให้น้ำอ่อนที่ส่งไปรั่วไหล

2) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Material

- น้ำดิบมีความกระด้างเกินมาตรฐาน น้ำกระด้างก่อนเข้าระบบน้ำอ่อนมีการกำหนดมาตรฐานให้ไม่เกิน 110 mg/l as $CaCO_3$ ถ้าความกระด้างขาเข้ามีค่ามากกว่าก็ทำให้เรซิ่นมีการแลกเปลี่ยนประจุมากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบจะมีค่าลดลง

3) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Man

- พนักงานขาดประสบการณ์ ในการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบให้มากต้องอาศัยประสบการณ์พนักงานที่สูง เนื่องจากการเปิดปิดวาล์วต้องทำตามลำดับ และต้องจับเวลาแต่ละขั้นตอน รวมทั้งการตรวจวัดความกระด้างเทียบกับสีมาตรฐาน ทั้งหมดเป็นระบบที่อาศัยพนักงาน (Manual) ทำให้มีผลโดยตรงกับปริมาณน้ำต่อรอบ

- พนักงานจดค่าผิด ทุกชั่วโมงจะมีการบันทึกปริมาณน้ำที่จ่ายให้กับกระบวนการอื่น และปริมาณน้ำที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดรอบการฟื้นฟูเรซิ่น ถ้าพนักงานจดเลขน้ำผิดรอบการฟื้นฟูเรซิ่นก็จะผิดเพี้ยนตาม ทำให้ปริมาณน้ำต่อรอบมากหรือน้อยกว่าเดิม

4) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Environment

- ฝุ่นในโรงงานมีอนุภาคขนาดเล็ก หรือสิ่งแปลกปลอมเมื่อตกไปในบ่อพักน้ำจะทำให้ปริมาณความกระด้างมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ามาตรฐาน ปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตมีค่าลดลงได้

5) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Measurement

- เครื่องมือวัดมีความเก่าและไม่ได้รับการสอบเทียบ ค่าปริมาณน้ำอ่อนได้จากการอ่านอัตราการไหล และในขั้นตอนการฟื้นฟูเรซิ่นต้องมีการอ่านอัตราการไหลเกลือ ถ้าเครื่องมือวัดมีความผิดเพี้ยน ก็จะทำให้เรซิ่นฟื้นฟูได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบมีค่าน้อยลง

6) พิจารณาสาเหตุย่อยจาก Method

- อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม อัตราการไหลเข้าปัจจุบันตั้งไว้ที่ 40 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ซึ่งค่าที่ใช้มาจากการปรับกันเองของพนักงาน เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำอ่อนที่ต้องการต่อชั่วโมง ปัจจัยนี้มี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลต่อปริมาณน้ำอ่อน เนื่องจากอัตราการไหลที่เร็วจะทำให้ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนของน้ำกับเรซิ่นมีน้อย ทำให้เรซิ่นเสื่อมสภาพช้าลง

- อัตราการไหลล้างกลับไม่เหมาะสม ปัจจัยอัตราการไหลล้างกลับอยู่ในขั้นตอนการล้างกลับ (Back wash) เป็นขั้นตอนที่จะทำให้เรซิ่นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เป็นการใช้แรงดันน้ำ ดันย้อนกลับจากล่างขึ้นบน เพื่อกระบวนการฟื้นฟูเรซิ่นจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น โอกาสในการสัมผัสน้ำเกลือกับเรซิ่นมีมากขึ้น ประสิทธิภาพเรซิ่นฟื้นฟูได้เต็มที่ เป็นผลให้ผลิตน้ำอ่อนต่อรอบได้มากขึ้น

- ความเข้มข้นของน้ำเกลือไม่เหมาะสม น้ำเกลือเป็นสารฟื้นฟูให้เรซิ่นเพื่อแลกเปลี่ยนไอออนได้ดังเดิม แต่ค่าความเข้มข้นของเกลือสำหรับโรงงานตัวอย่างยังไม่มีการทดลองว่าค่าไหนจะทำให้เรซิ่นมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยค่าปัจจุบันอยู่ที่ 10%

- ระยะเวลาการฟื้นฟูเรซิ่นไม่เหมาะสม การฟื้นฟูเรซิ่นนอกจากพิจารณาความเข้มข้นของเกลือแล้ว ปริมาณเกลือที่ใช้หรือระยะเวลาที่ใช้เป็นปัจจัยหนึ่ง โดยระยะเวลาที่ใช้นี้ไม่ได้มาจากการทดลอง แต่มาจากการสังเกตและการตกลงกันของพนักงาน เพื่อให้การผลิตไม่ล่าช้า ปัจจัยนี้จึงส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ผลิตด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 สรุปสาเหตุที่เป็นไปได้ในการเกิดปัญหา

หลังจากการระดมความคิดของทีมผู้เชี่ยวชาญเป็นแผนผังก้างปลา สามารถสรุปสาเหตุได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงลักษณะปัญหาและสาเหตุ

ลักษณะของปัญหา	สาเหตุ
ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบน้อย	พนักงานขาดประสบการณ์
	พนักงานจดค่าผิด
	เรซิ่นเสื่อมสภาพ
	น้ำดิบมีความกระด้างเกินมาตรฐาน
	วาล์วฝืด
	ท่อรั่วซึม
	ความขุ่นจากฝุ่น
	เครื่องมือวัดไม่ได้รับการสอบเทียบ
	อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม
	อัตราการไหลการล้างกลับไม่เหมาะสม
	ความเข้มข้นของน้ำเกลือไม่เหมาะสม
	ระยะเวลาการฟื้นฟูเรซิ่นไม่เหมาะสม
การรั่วไหลของน้ำกระด้าง	พนักงานขาดประสบการณ์
	พนักงานจดค่าผิด
	เรซิ่นเสื่อมสภาพ
	น้ำดิบมีความกระด้างไม่คงที่
	วาล์วตอบสนองช้า
	ตะแกงเกิดการรั่ว
	ความขุ่นจากฝุ่น
	เครื่องมือวัดไม่ได้รับการสอบเทียบ
	ไม่มีการบันทึกค่า
	การตรวจสอบสภาพเรซิ่นมีการคลาดเคลื่อน
	การตรวจวัดความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4 การประเมินข้อบกพร่อง (Severity of failures : S)

เมื่อได้สาเหตุทั้งหมด 20 ข้อโดยไม่รวมสาเหตุที่ซ้ำกันจากตารางที่ 3.1 แล้ว ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยพิจารณาตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number : RPN) และคัดเลือกปัจจัยที่มีค่าแสดงลำดับความเสี่ยงที่สูง ก็จะนำไปปรับปรุงต่อไป

ขั้นตอนแรกจะเป็นการให้คะแนนค่าความรุนแรงของข้อบกพร่อง (S) เกณฑ์การให้คะแนนตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์ความรุนแรงของข้อบกพร่อง

ผลกระทบจากข้อบกพร่อง	ตัวอย่าง	ระดับ
เกิดอันตรายโดยไม่มีการเตือน	แผนกที่นำน้ำอ่อนไปใช้ เครื่องจักรเสีย และไม่มีการเตือนล่วงหน้า	10
เกิดอันตรายโดยมีการเตือน	แผนกที่นำน้ำอ่อนไปใช้ เครื่องจักรเสีย ใช้งานไม่ได้ โดยมีการเตือนล่วงหน้า	9
มีผลกระทบสูงมาก	100% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องรอน้ำอ่อนมากกว่า 2 ชั่วโมง	8
มีผลกระทบสูง	75% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องชะลอการผลิตระหว่าง 1 ถึง 2 ชั่วโมง	7
ผลกระทบปานกลาง	50% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องชะลอการผลิตระหว่าง 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง	6
ผลกระทบต่ำ	25% ของผลิตภัณฑ์จากน้ำอ่อนไม่สามารถใช้งานได้ หรือต้องชะลอการผลิตไม่เกิน 30 นาที	5
ผลกระทบต่ำมาก	ผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ แต่เครื่องจักรทำงานหนักขึ้นมากกว่า 25%	4
เกือบไม่มีผลกระทบ	ผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ แต่เครื่องจักรทำงานหนักขึ้นระหว่าง 24 ถึง 15 %	3
เกือบไม่มีผลกระทบ	ผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ แต่เครื่องจักรทำงานหนักขึ้นจากเดิมไม่เกิน 14 %	2
ไม่มีผลกระทบ	ไม่มีผลกระทบใดๆ	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.1 การกำหนดค่าคะแนนความรุนแรงจากลักษณะข้อบกพร่อง

ความรุนแรงของข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตน้ำอ่อน ผู้วิจัยจะอ้างอิงจากตารางที่ 3.2 โดยข้อบกพร่องที่พิจารณามี 2 ข้อดังนี้

1) ปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบน้อย

เป็นลักษณะข้อบกพร่องที่มีผลกระทบสูง อันเนื่องมาจาก ถ้าน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบมีค่าน้อย จะทำให้การฟื้นฟูสภาพเรซินเกิดบ่อยครั้ง เป็นผลให้ปริมาณน้ำในระบบไม่เพียงพอ ทีมผู้เชี่ยวชาญจึงเลือกระดับความรุนแรงที่ 7

2) การรั่วไหลของน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐาน

เป็นลักษณะข้อบกพร่องที่มีผลกระทบสูงมาก อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำกระด้างที่เกินมาตรฐาน เมื่อไปแผนกอื่นจะนำทิ้งทันที ทีมผู้เชี่ยวชาญจึงเลือกระดับความรุนแรงที่ 8 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความรุนแรงของข้อบกพร่อง

ลำดับที่	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของลักษณะข้อบกพร่อง	ระดับความรุนแรง
1	ปริมาณการผลิตน้ำอ่อนต่อรอบไม่เพียงพอ	- ปริมาณการใช้น้ำไม่เพียงพอ - ต้องชะลอการผลิต	7
2	การรั่วไหลของน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐาน	- เครื่องจักรใช้งานได้ไม่เต็มที่ - ต้องทิ้งน้ำอ่อนที่ไม่ได้มาตรฐาน	8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4 การประเมินโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence : O) และการความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (Detection : D)

ขั้นตอนต่อไปในการประเมินความเสี่ยงคือการประเมินโอกาสในการเกิดข้อบกพร่องและความเป็นไปได้ในการตรวจพบ ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ตารางที่ 3.4 และ 3.5 เป็นเกณฑ์ในการประเมินความเสี่ยงของระบบน้ำอ่อน

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์การประเมินโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (O)

โอกาสในการเกิด	ตัวอย่าง	ลำดับคะแนน
สูงมาก	จำนวนครั้งที่พบปัญหามากกว่า 90 %	10
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 89.99 - 80 %	9
สูง	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 79.99 - 70 %	8
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 69.99 - 60 %	7
ปานกลาง	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 59.99 - 50 %	6
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 49.99 - 40 %	5
ต่ำ	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 39.99 - 30 %	4
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 29.99 - 20 %	3
ต่ำมาก	จำนวนครั้งที่พบปัญหาอยู่ในช่วง 19.99 - 10 %	2
	จำนวนครั้งที่พบปัญหาน้อยกว่า 9.99 %	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบข้อบกพร่อง (D)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจพบ			การควบคุมที่ใช้เพื่อให้ตรวจพบ	ลำดับคะแนน
		A	B	C		
แทบเป็นไปไม่ได้	ไม่สามารถตรวจพบได้			X	ไม่สามารถตรวจพบหรือไม่มีการตรวจ	10
เป็นไปได้ยากมาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบทางอ้อมหรือการสุ่มตรวจสอบ	9

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบข้อบกพร่อง (D) (ต่อ)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจพบ			ตัวอย่าง	ลำดับคะแนน
		A	B	C		
เป็นไปได้ยาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น	8
ต่ำมาก	เป็นไปได้ยากมากที่การควบคุมจะตรวจพบ			X	การควบคุมมีเพียงการตรวจสอบด้วยสายตา 2 ครั้งเท่านั้น	7
ต่ำ	การควบคุมจะตรวจพบได้		X	X	การควบคุมมีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด	6
ปานกลาง	การควบคุมจะตรวจพบได้		X		มีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดข้อบกพร่อง	5
ปานกลางถึงค่อนข้างสูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบปัญหาในกระบวนการย่อยต่างๆ ได้หรือใช้เครื่องมือตรวจสอบการตั้งค่าระบบตั้งแต่ครั้งแรก	4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบข้อบกพร่อง (D) (ต่อ)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจพบ			การควบคุมที่ใช้เพื่อให้ตรวจพบ	ลำดับคะแนน
		A	B	C		
สูง	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบปัญหาในจุดปฏิบัติงานหรือตรวจพบในหลายๆจุด	3
สูงมาก	การควบคุมมีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	X	X		ตรวจสอบปัญหาในจุดปฏิบัติงานโดยมีการใช้อุปกรณ์อัตโนมัติเข้าร่วม	2
สูงมาก	การควบคุมมีโอกาสแน่นอนที่จะตรวจพบ	X			ตรวจสอบปัญหาได้เนื่องจากมีตัวป้องการความผิดพลาด	1

3.4.1 การกำหนดค่าคะแนนโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (O) และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D)

1) วาล์วฝืด เป็นลักษณะข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดน้อย เนื่องจากการหมุนวาล์วจะหมุนแค่ในช่วงเปลี่ยนวัฏจักรการผลิต เช่นเปลี่ยนจากการจ่ายน้ำ เป็นการฟื้นฟูเรซิน ทีมผู้เชี่ยวชาญจึงกำหนดคะแนนโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (O)เป็น 3 และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 เนื่องจากมีตัวป้องกันความผิดพลาด และมีอุปกรณ์ในการตรวจสอบ

2) ท่อรั่วซึม สาเหตุเกิดจากท่อเสื่อมสภาพ ความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดน้อย และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 เนื่องจากมีตัวป้องกันความผิดพลาด และมีอุปกรณ์ในการตรวจสอบ

3) พนักงานขาดประสบการณ์ สาเหตุเกิดจากพนักงานยังใหม่ ความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 7 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับสูง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 5 เนื่องจากตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) พนักงานจดค่าผิด สาเหตุเกิดจากใช้กระดาษจด,จดเลขเพี้ยนความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 2 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับปานกลาง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 เนื่องจากมีเฉพาะการตรวจสอบจากกระบวนการอื่นได้

5) ความขุ่นจากฝุ่น สาเหตุเกิดจากเป็นฤดูฝน ความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับปานกลาง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 เนื่องจากมีตัวป้องกันความผิดพลาด และมีอุปกรณ์ในการตรวจสอบ

6) อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม สาเหตุเกิดจากไม่มีการทดลองหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 10 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับน้อย และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 เนื่องจากมีตัวป้องกันความผิดพลาดและมีอุปกรณ์ในการตรวจสอบ

7) เครื่องมือไม่ได้รับการสอบเทียบ สาเหตุเกิดจากขาดกำหนดการสอบเทียบ ความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับปานกลาง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 เนื่องจากมีตัวป้องกันความผิดพลาด และมีอุปกรณ์ในการตรวจสอบ

8) ความเข้มข้นน้ำเกลือไม่เหมาะสม สาเหตุเกิดจากใช้ประสบการณ์ส่วนตัวความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 7 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับปานกลาง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 เนื่องจากตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

9) ใช้เวลาฟื้นฟูเรซินไม่เหมาะสม สาเหตุเกิดจากแต่ละคนใช้เวลาไม่เท่ากันความถี่ในการเกิด (O) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 7 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับสูง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 เนื่องจากตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

10) อัตราการไหลการล้างกลับไม่เหมาะสม สาเหตุเกิดจากพนักงานมีวิธีการปฏิบัติงานไม่เหมือนกัน โดยการล้างกลับจะสังเกตจากเรซินมีการกระจายตัวมากหรือไม่จากกระจกข้างถัง (sight glass) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 7 เนื่องจากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดระดับสูง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบสูง (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 เนื่องจากตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

11) เรซิ่นเสื่อมสภาพถาวร สาเหตุเกิดจากเรซิ่นเมื่อใช้ไปประมาณ 2-5 ปีจะมีการเสื่อมสภาพถาวร เมื่อฟื้นฟูสภาพก็จะให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบน้อยลง ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการ

เกิด (O) 1 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดต่ำมาก และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 คะแนนเนื่องจากการควบคุมใช้การตรวจสอบที่จุดปฏิบัติงาน

12) น้ำดิบขาเข้ามีความกระด้างเกินมาตรฐาน เนื่องจากน้ำที่เข้าระบบน้ำอ่อนมาจากระบบบำบัดน้ำเบื้องต้น ความกระด้างที่เข้ามามีค่าไม่คงที่ แต่มีการควบคุมไว้อยู่ที่ 85-115 mg/l as $CaCO_3$ ในบางกรณีมีการสุ่มตรวจพบว่าอาจเกินค่าที่กำหนดเล็กน้อย ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการเกิด (O) 3 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดต่ำ และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 คะแนนเนื่องจากการควบคุมใช้การตรวจสอบที่จุดปฏิบัติงาน

13) วาล์วตอบสนองช้า เนื่องจากการหมุนวาล์วใช้พนักงานหมุน เมื่อเทียบกับอัตราการไหลเข้าของน้ำ การหมุนวาล์วจะช้ามาก ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการเกิด (O) 4 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดปานกลาง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 คะแนนเนื่องจากมีการตรวจสอบที่จุดปฏิบัติงาน

14) ตะแกงเกิดรั่ว เนื่องจากไม่มีการซ่อมบำรุงหรือตรวจเช็ค ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการเกิด (O) 1 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดต่ำมาก และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 คะแนนเนื่องจากมีการตรวจสอบที่จุดปฏิบัติงาน

15) ไม่มีการบันทึกค่า เนื่องจากพนักงานบางท่านไม่มีการบันทึกและคำนวณค่าน้ำอ่อนที่รั่วไหล ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการเกิด (O) 4 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดปานกลาง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 3 คะแนนเนื่องจากมีการตรวจสอบที่จุดปฏิบัติงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

16) การตรวจสอบสภาพเรซิ่นมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากการตรวจสอบโดยการหยดสารและใช้สายตาทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการเกิด (O) 8 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดสูง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 8 คะแนนเนื่องจากการตรวจสอบเป็นไปได้ยาก

17) การตรวจวัดความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน การหยดสารทดสอบ ทำในขณะที่น้ำอ่อนผลิตอยู่ซึ่งค่าที่ได้ จะไม่ใช่ค่าที่เป็นจริงในขณะนั้น ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการเกิด (O) 9 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดสูงมาก และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 คะแนนเนื่องจากการตรวจสอบได้ที่กระบวนการย่อย

18) ไม่มีการแจ้งเตือนเรซิ่นเสื่อมสภาพ เนื่องจากไม่มีการทำระบบการแจ้งเตือนล่วงหน้าจะปัจจุบันใช้การนับปริมาณน้ำ ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความถี่ในการเกิด (O) 8 เนื่องจากมีโอกาสใน

การเกิดสูง และความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) ทีมผู้เชี่ยวชาญให้คะแนน 4 คะแนนเนื่องจากการตรวจสอบได้ที่กระบวนการย่อย

ผู้วิจัยได้ทำตารางสรุปคะแนนความถี่ในการเกิดข้อบกพร่อง (O) และคะแนนสรุปคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบข้อบกพร่อง (D) ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สรุปคะแนนความถี่ในการเกิดข้อบกพร่อง (O)

ลำดับที่	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของลักษณะข้อบกพร่อง	สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องที่พบ	ระดับความถี่ (O)	ระดับการควบคุม (D)
1	ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบน้อย	-ปริมาณน้ำอ่อนไม่เพียงพอ -ชะลอการผลิต	พนักงานขาดประสบการณ์	7	5
			พนักงานจดค่าผิด	2	4
			เรซินเสื่อมสภาพถาวร	1	3
			น้ำดิบมีความกระด้างเกินมาตรฐาน	3	3
			วาล์วฝืด	3	3
			ท่อรั่วซึม	3	3
			ความขุ่นจากฝน	4	3
			อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม	10	4
			อัตราการไหลล้างกลับไม่เหมาะสม	7	4
			ความเข้มข้นของเกลือไม่เหมาะสม	7	4
			ระยะเวลาการฟื้นฟูเรซิ่นไม่เหมาะสม	7	4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.6 สรุปคะแนนความถี่ในการเกิดข้อบกพร่อง (O) (ต่อ)

ลำดับที่	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของลักษณะข้อบกพร่อง	สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องที่พบ	ระดับความถี่ (O)	ระดับการควบคุม (D)
2	การรั่วไหลของน้ำกระด้าง	- เครื่องจักรมีประสิทธิภาพไม่เต็มที่ -ต้องระบายน้ำอ่อนทิ้ง	ไม่มีการแจ้งเตือนเรซิ่นเมื่อเสื่อมสภาพ	8	4
			วาล์วตอบสนองช้า	4	3
			ตะแกงรั่ว	1	3
			เครื่องมือวัดไม่ได้รับการสอบเทียบ	4	3
			ไม่มีการบันทึกค่า	4	3
			การตรวจสภาพเรซิ่นมีการคลาดเคลื่อน	8	8
			การตรวจวัดความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน	9	4

เมื่อได้คะแนนระดับความรุนแรง (S) คะแนนระดับความถี่ (O) และคะแนนระดับการควบคุม (D) แล้ว สามารถคำนวณเลขลำดับความเสี่ยงจาก RPN = S x O x D ได้ดังตารางที่ 3.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.7 ค่า RPN ที่เกิดขึ้น

ลำดับที่	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของลักษณะข้อบกพร่อง	SEV	สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องที่พบ	OCC	DET	RPN
1	ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบน้อย	-ปริมาณน้ำอ่อนไม่เพียงพอ -ชะลอการผลิต	7	พนักงานขาดประสบการณ์	7	5	245
				พนักงานจดค่าผิด	2	4	56
				เรซินเสื่อมสภาพถาวร	1	3	21
				น้ำดิบมีความกระด้างเกินมาตรฐาน	3	3	63
				วาล์วฝืด	3	3	63
				ท่อรั่วซึม	3	3	63
				ความขุ่นจากฝน	4	3	84
				อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม	10	4	280
				อัตราการไหลล้างกลับไม่เหมาะสม	7	4	196
				ความเข้มข้นของเกลือไม่เหมาะสม	7	4	196
				ระยะเวลาการฟื้นฟูเรซิ่นไม่เหมาะสม	7	4	196
2	การรั่วไหลของน้ำกระด้าง	- เครื่องจักรมีประสิทธิภาพไม่เต็มที่ -ต้องระบายน้ำอ่อนทิ้ง	8	ไม่มีการแจ้งเตือนเมื่อเรซิ่นเสื่อมสภาพ	8	4	256
				วาล์วตอบสนองช้า	4	3	96
				ตะแกงรั่ว	1	3	24
				เครื่องมือวัดไม่ได้รับการสอบเทียบ	4	3	96
				ไม่มีการบันทึกค่า	4	3	96
				การตรวจสภาพเรซิ่นมีการคลาดเคลื่อน	8	8	512
				การตรวจวัดความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน	9	4	288

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 3.7 สรุปได้ว่าค่า RPN ที่มีค่าเกิน 100 คือ พนักงานขาดประสบการณ์ การตรวจสอบสภาพเรซิ่นมีการคลาดเคลื่อน ไม่มีการแจ้งเตือนเมื่อเรซิ่นเสื่อมสภาพ การตรวจวัดค่าความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม อัตราการไหลการล้างกลับไม่เหมาะสม ความเข้มข้นของเกลือไม่เหมาะสม และระยะการฟื้นฟูเรซิ่นไม่เหมาะสม โดยผู้วิจัยจะเลือก 8 ปัจจัยนี้ในการปรับปรุงกระบวนการโดยสามารถสรุปแนวทางการแก้ปัญหาได้ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ปัจจัยที่จะดำเนินการแก้ไข

ลำดับที่	สาเหตุ	แนวทางการปรับปรุง
1	พนักงานขาดประสบการณ์	ลดการใช้คนในการทำงาน เปลี่ยนเป็นระบบอัตโนมัติ
2	การตรวจสอบสภาพเรซิ่นมีการคลาดเคลื่อน	เปลี่ยนการทดสอบเรซิ่นจากการหยดน้ำยา มาใช้เครื่องมือวัดและวิเคราะห์ความกระด้าง (Hardness analyzer) เพื่อบันทึกค่าไปยัง SCADA
3	ไม่มีการแจ้งเตือนเมื่อเรซิ่นเสื่อมสภาพ	ทำ Webserver โดยนำข้อมูล Hardness analyzer มาแสดงผ่าน Web browser และทำเครือข่ายขึ้นใหม่โดยใช้ Router ของโรงงานเป็น Access point ในการเชื่อมต่อผ่านมือถือได้ทั่วโรงงาน
4	การตรวจวัดค่าความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน	นำค่า Hardness analyzer มาแสดงที่หน้าจอ HMI และหน้าจอมือถือ
5	อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
6	อัตราการไหลการล้างกลับไม่เหมาะสม	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
7	ความเข้มข้นของเกลือไม่เหมาะสม	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
8	ระยะการฟื้นฟูเรซิ่นไม่เหมาะสม	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
แนวทางการปรับปรุงและดำเนินการแก้ไข

จากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในบทที่ 3 พบว่าค่าความเสี่ยง (RPN) ที่มากกว่า 100 คือ การใช้เวลาฟื้นฟูเรซินไม่เหมาะสม,พนักงานขาดประสบการณ์ พนักงานจดค่าผิด อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม ระยะเวลาการล้างกลับไม่เหมาะสม และอัตราการผสมน้ำกับเกลือไม่เหมาะสม ในบทนี้จะกล่าวถึงการแก้ปัญหาดังกล่าวของโรงงานกรณีศึกษาต่อไป

4.1 ปัญหาพนักงานขาดประสบการณ์

เนื่องจากทุกๆปีของโรงงานในเครือจะมีการหมุนเวียนสับเปลี่ยนพนักงาน ทำให้ช่วงแรกของการผลัดเปลี่ยน มีปัญหาจากคุณภาพน้ำ อันเนื่องมาจากการผลิตน้ำจะต้องหมุนวาล์วทั้งหมด 16 ตัว โดยมีการหมุนที่เป็นลำดับขั้นตอน และต้องหมุนในเวลาที่เท่ากัน ประกอบกันพนักงานหนึ่งคน นอกจากมีหน้าที่ในการหมุนวาล์วหรือคุมการผลิตน้ำแล้ว จะต้องทำหน้าที่ในการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน ทำให้ในบางครั้งไม่มีการฟื้นฟูสภาพเรซินเมื่อถึงเวลาอันควร หรือเกิดการทำงานที่ผิดขั้นตอน

รูปที่ 4.1 วาล์ว Softener แบบ manual

จากรูปที่ 23 เดิมพนักงานจะต้องหมุนวาล์วที่หน้างาน โดยต้องใช้ประสบการณ์ของแต่ละคน เช่น ตำแหน่งวาล์วที่หมุน และเวลาที่ต้องใช้ Back Wash เปลี่ยนเป็นการกดเปลี่ยนเวลาในการ Back Wash และไม่จำเป็นต้องหมุนวาล์วหน้างาน ทำให้ลดการใช้ประสบการณ์ของพนักงาน และลดหน้าที่ลง

รูปที่ 4.2 วาล์ว Softener แบบ Automation

จากรูปที่ 24 แนวทางในการแก้ปัญหา ทีมผู้เชี่ยวชาญได้ทำการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อลดปัญหานี้ โดยการผลิตจะให้เป็นระบบอัตโนมัติโดยการเปลี่ยนวาล์ว และอุปกรณ์หน้างาน ให้ควบคุมโดย PLC (Programmable Logic Controller) แทนการควบคุมจากคน โดยลดขั้นตอนการปฏิบัติงาน ทำให้ลดการใช้ทักษะประสบการณ์ลง โดยใช้หน้าจอ HMI ที่ติดตั้งขึ้นมาใหม่ ดังรูปที่ 25 วิธีใช้งานผู้วิจัยได้ทำไว้ตามภาคผนวก

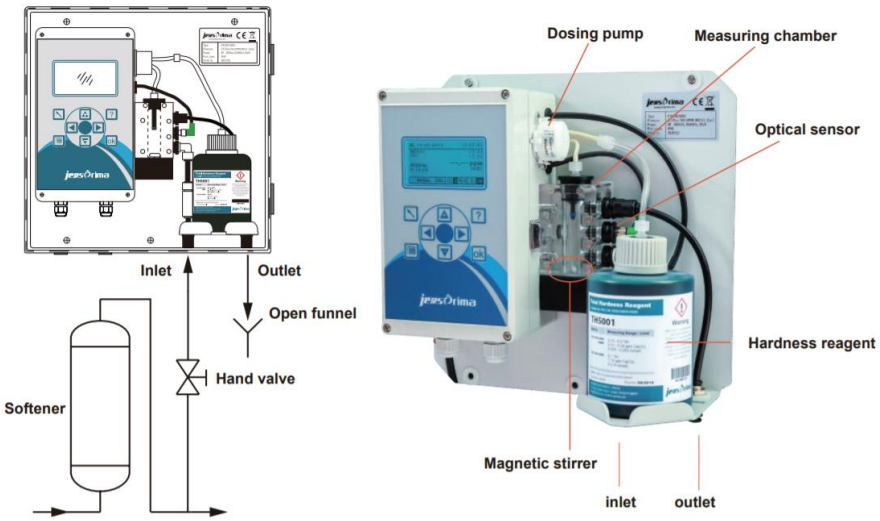
รูปที่ 4.3 หน้าจอ HMI ที่ติดตั้งใหม่

4.2 **ปัญหาการแจ้งเตือนการเสื่อมสภาพของเรซิ่น**

การเสื่อมสภาพของเรซิ่น หมายถึง คุณภาพของเรซิ่นหลังจากฟื้นฟูประจุแล้ว ให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบที่น้อยลง โดยปกติเรซิ่นจะมีอายุการใช้งานโดยเฉลี่ย 2-4 ปี ขึ้นอยู่กับความกระด้างของน้ำขาเข้า ถ้าไม่มีการบำบัดน้ำเบื้องต้นก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำอ่อนก็จะทำให้เรซิ่นเสื่อมสภาพได้เร็ว แต่ถ้ามีการบำบัดน้ำขาเข้าเบื้องต้นก่อน (Pre-treatment) จะทำให้อายุการใช้งานเรซิ่นนานขึ้น หรือแรงดันน้ำที่ไหลเข้าถังที่มากทำให้เรซิ่นเกิดการแตกเสื่อมสภาพได้

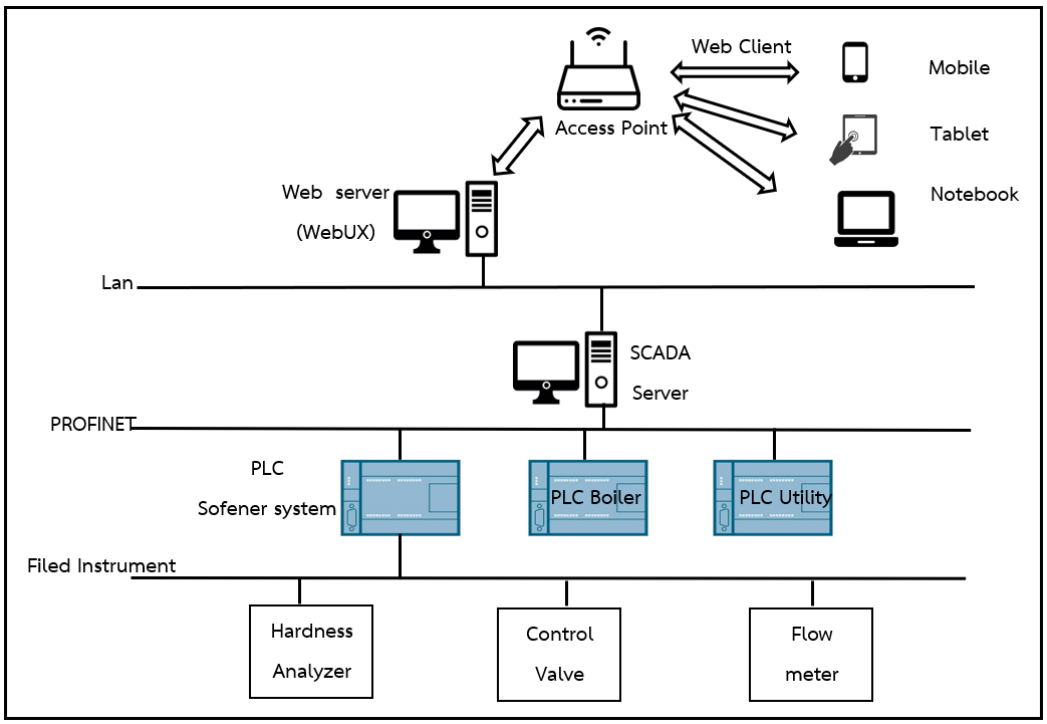
วิธีการตรวจสอบการเสื่อมสภาพเรซิ่นของโรงงานตัวอย่างจะใช้การตรวจสอบโดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ทดสอบ พร้อมกับหยดสารเคมีทดสอบ และสังเกตุสีที่เปลี่ยน ถ้าได้สีน้ำเงินหมายถึงความกระด้างไม่เกิน 5 mg/l เรซิ่นยังไม่เสื่อมสภาพ สามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่ถ้าสีที่ได้เป็นสีม่วงอมน้ำเงิน แสดงว่าความกระด้างของน้ำเกิน 50 mg/L หมายถึงเรซิ่นมีการเสื่อมสภาพ ต้องหยุดระบบจ่ายน้ำอ่อนและทำการฟื้นฟูสภาพเรซิ่น ซึ่งการตรวจสอบลักษะนี้มีความผิดพลาดสูง ถ้าพนักงานมองสีผิดเพี้ยนอาจทำให้ความกระด้างของน้ำที่เกินมาตรฐานรั่วไหลไปกระบวนถัดไปได้ หรือกรณีที่ตรวจสอบความกระด้างของน้ำ และพบว่าเรซิ่นเสื่อมสภาพแต่ตรวจสอบได้ล่าช้าก็จะเกิดการรั่วไหลของน้ำกระด้างได้เช่นกัน

แนวทางการแก้ไข ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจจับความกระด้างของน้ำ เพื่อทำการตรวจจับความกระด้างของน้ำที่เกินมาตรฐานแบบอัตโนมัติ (Hardness analyzer) ดังรูปที่ 26



รูปที่ 4.4 Hardness analyzer

จากรูปที่ 4.4 อุปกรณ์ที่จะนำมาแทนที่การตรวจจับความกระด้างแทนพนักงาน ประกอบไปด้วยท่อขาเข้า (Inlet) สำหรับดูดน้ำตัวอย่างของระบบน้ำอ่อนเพื่อทดสอบโดยน้ำยา (Hardness reagent) ผลการทดสอบสามารถแสดงในหน่วย mg/l as $CaCO_3$ ที่หน้าจอได้ เนื่องจากผู้วิจัยไม่ต้องการให้พนักงานเสียเวลาบันทึกค่า และต้องคอยทำรายงาน อาจจะทำให้การแจ้งเตือนการเสื่อมสภาพเรซิ่นล่าช้า เลยใช้สัญญาณไฟฟ้า 4-20 mA (Analog signal) แทนดังรูปที่ 27



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.5 ระบบเครือข่ายสำหรับตรวจค่าความกระด้าง

4.3 การแก้สาเหตุพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม

พารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ คือ ความเข้มข้นของสารส้ม,ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินและความเข้มข้นน้ำเกลือ ในการผลิตน้ำอ่อนจะใช้สารส้มเพื่อทำให้สารแขวนลอยที่มาจากแม่น้ำตะกอน โดยเป็นการกำจัดสารแปลกปลอมเบื้องต้น ซึ่งส่งผลให้ลดความกระด้างชั่วคราวได้ และระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน จะเป็นการใช้น้ำเกลือเข้าไปทำปฏิกิริยาเคมี ทำให้เรซินที่ใช้บำบัดน้ำกระด้างถาวรมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น แต่ในการผลิตปัจจุบันยังไม่มีการปรับตั้งพารามิเตอร์ส่วนนี้

4.3.1 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken)

ทีมผู้เชี่ยวชาญได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากว่าหากใช้การทดลองแบบประสมกลาง (CCD) จะต้องทดลอง 31 การทดลอง ส่วนบ็อกซ์-เบห์นเคนจะทดลองที่ 27 การทดลอง ซึ่งทีมผู้เชี่ยวชาญสามารถยอมรับได้ โดยผู้วิจัยได้กำหนดระดับปัจจัยไว้ 3 ระดับ ดังตารางที่ 4.1 ระดับสูง (+1) ,ระดับกลาง (0) และระดับต่ำ (-1) ซึ่งค่าระดับปัจจัยของพารามิเตอร์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอยู่ที่ระดับกลาง ในการปรับพารามิเตอร์ของอัตราการไหลเข้าจะปรับทีละ 10 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง เนื่องจากการปรับอัตราการไหลเข้าที่มากเกินจะกระทบกับค่าความกระด้างของน้ำ (Hardness) การปรับระดับปัจจัยของระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน จะปรับทีละ 10 นาที เนื่องจากการปรับเวลาที่มากจะส่งผลต่อต้นทุนที่สูง และพารามิเตอร์ความเข้มข้นของเกลือจะปรับระดับทีละ 5 % เพราะสะดวกในการคำนวณปริมาณเกลือ และถูกกำหนดโดยต้นทุนของโรงงาน

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับของการทดลอง

ลำดับที่	ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	-1	0	1
1	อัตราการไหลเข้า	A	ลบ.ม./ชั่วโมง	30	40	50
2	ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน	B	นาที	5	10	15
3	อัตราการไหลในการล้างกลับ	C	ลบ.ม./ชั่วโมง	5	10	15
4	ความเข้มข้นน้ำเกลือ	D	%	5	10	15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หลังจากกำหนดระดับปัจจัยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบตารางการออกแบบการทดลอง (Design Metrix) โดยการออกแบบตารางการออกแบบการทดลองจะกำหนดลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่ม เพื่อลดตัวแปรรบกวน และทำให้ผลการทดลองเป็นอิสระต่อกัน ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Metrix)

Std Order	Run Order	Factor			
		A	B	C	D
23	1	40	5	10	15
10	2	50	10	10	5
13	3	40	5	5	10
5	4	40	10	5	5
17	5	30	10	5	10
9	6	30	10	10	5
25	7	40	10	10	10
1	8	30	5	10	10
2	9	50	5	10	10
20	10	50	10	15	10
18	11	50	10	5	10
6	12	40	10	15	5
21	13	40	5	10	5
14	14	40	15	5	10
15	15	40	5	15	10
27	16	40	10	10	10
11	17	30	10	10	15
22	18	40	15	10	5
7	19	40	10	5	15
3	20	30	15	10	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Metrix) (ต่อ)

Std Order	Run Order	Factor			
		A	B	C	D
16	21	40	15	15	10
12	22	50	10	10	15
24	23	40	15	10	15
8	24	40	10	15	15
19	25	30	10	15	10
4	26	50	15	10	10
26	27	40	10	10	10

4.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามลำดับจากโปรแกรม MINITAB โดยก่อนการทดลอง ผู้วิจัยได้ประชุมกับทีมงาน เพื่อกำหนดวิธีการปฏิบัติ ให้ไม่มีข้อผิดพลาด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ปรับอัตราการไหลโดยปรับที่หน้าจอ HMI (Human machine interface)
2. ตั้งระยะเวลาการฟื้นฟูเรซินตามแผนการทดลอง โดยปรับที่หน้าจอ HMI (Human machine interface)
3. ที่ถังพักน้ำสำหรับการตกตะกอน จะมีการระบายน้ำทิ้ง (Drain) เพื่อให้ความเข้มข้นของสารส้มก่อนหน้า ไม่ผสมกัน
4. เก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์ค่าความกระด้าง หลังจากดำเนินการทดลองตามตารางการออกแบบการทดลอง (Design Metrix) ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองตามลำดับจากโปรแกรม MINITAB

Std Order	Run Order	Factor				ปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ (ลบ.ม.)	PH	ค่าความนำไฟฟ้า (µs/cm)	Hardness (ppm)
		A	B	C	D				
23	1	40	5	10	15	1741	7.98	4.91	3.81
10	2	50	10	10	5	1782	7.54	5.84	4.74
13	3	40	5	5	10	1723	7.35	4.26	3.16
5	4	40	10	5	5	1713	7.81	4.78	3.68
17	5	30	10	5	10	1667	7.74	3.10	1.90
9	6	30	10	10	5	1676	7.71	3.50	2.40
25	7	40	10	10	10	1749	8.10	4.32	3.22
1	8	30	5	10	10	1663	7.85	3.04	1.74
2	9	50	5	10	10	1749	7.63	5.26	4.16
20	10	50	10	15	10	1830	7.45	5.40	4.30
18	11	50	10	5	10	1793	7.72	5.53	4.43
6	12	40	10	15	5	1758	7.32	5.30	3.90
21	13	40	5	10	5	1691	7.56	5.35	4.25
14	14	40	15	5	10	1762	7.83	4.73	3.63
15	15	40	5	15	10	1770	7.49	4.32	3.22
27	16	40	10	10	10	1732	7.67	4.52	3.42
11	17	30	10	10	15	1729	8.12	3.40	2.30
22	18	40	15	10	5	1691	7.33	4.62	3.52
7	19	40	10	5	15	1761	7.89	4.44	3.30
3	20	30	15	10	10	1750	8.13	2.93	1.83
16	21	40	15	15	10	1811	7.55	4.50	3.40
12	22	50	10	10	15	1799	7.83	5.24	4.14
24	23	40	15	10	15	1999	8.10	4.20	3.10
8	24	40	10	15	15	1809	7.57	4.28	2.95
19	25	30	10	15	10	1761	7.67	3.07	1.97
4	26	50	15	10	10	1788	7.82	5.07	4.07
26	27	40	10	10	10	1744	7.52	4.22	3.12

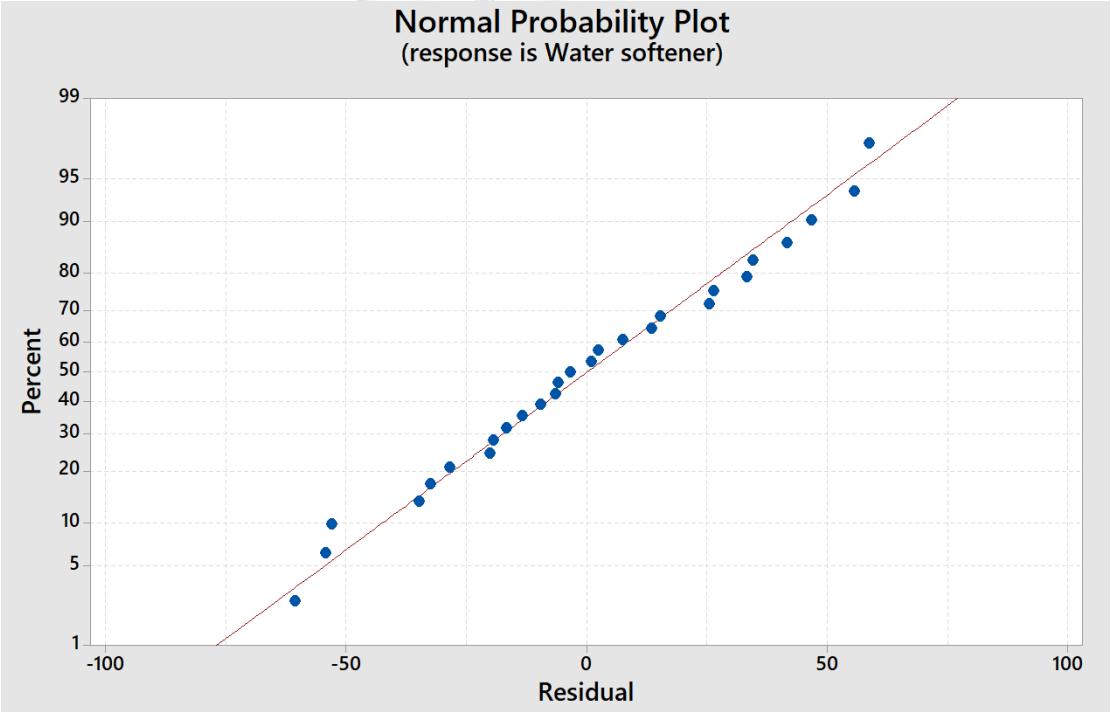
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากได้ผลการทดลองแล้ว จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนนำแบบจำลองมาใช้งาน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA)

1) การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

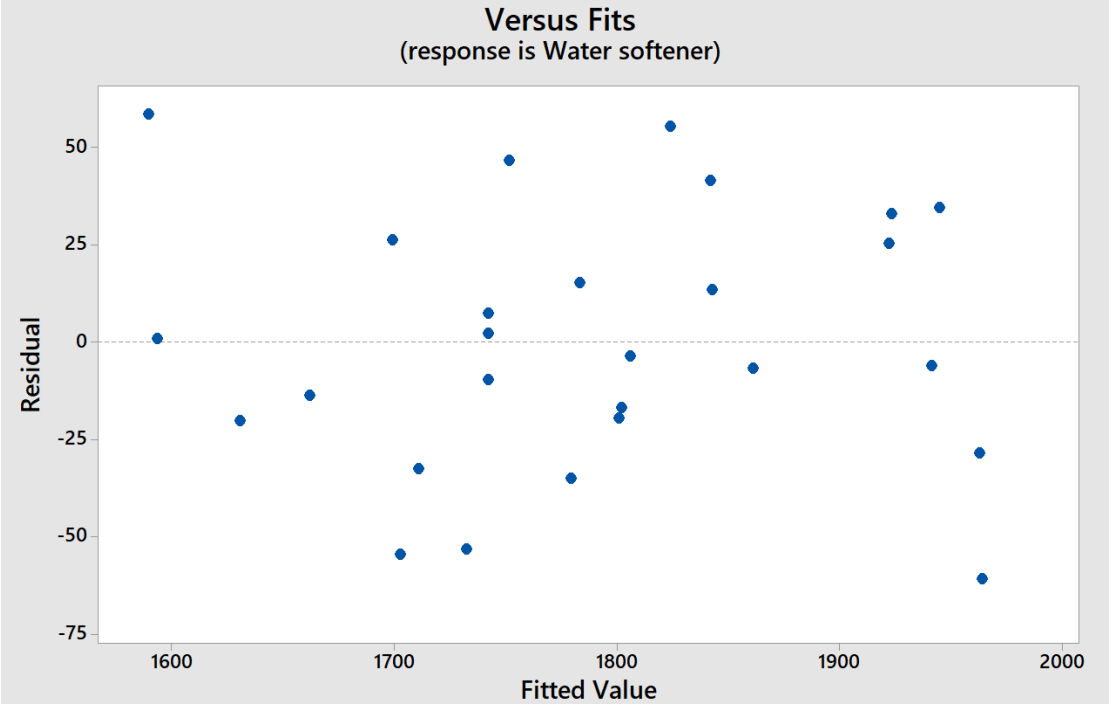
สามารถตรวจสอบได้โดยพิจารณากราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ ซึ่งจะมีส่วนตกค้าง (Residual) เรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง ดังรูปที่ 4.6 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-value 0.216 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายแบบปกติ



รูปที่ 4.6 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability)

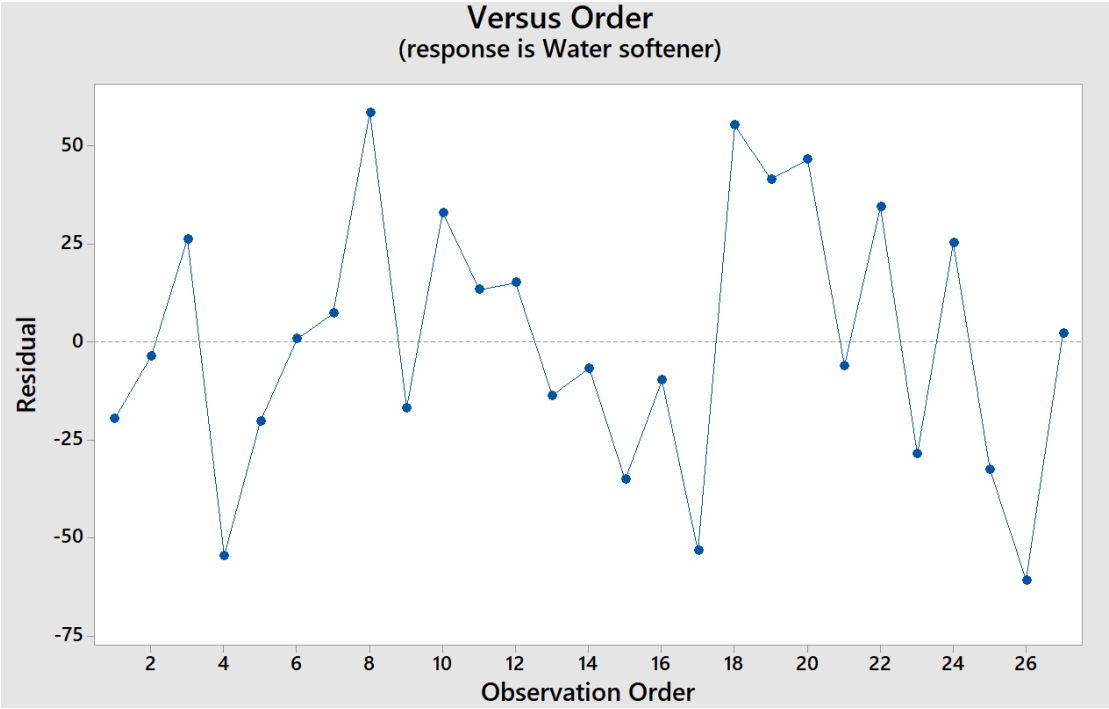
ตรวจสอบได้โดยพิจารณาของลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าประมาณ จากรูปที่ 4.7 พบว่าลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวแบบสุ่ม และไม่เป็นแนวโน้มหรือลักษณะรูปกรวยปากเปิด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างค่าตกค้างและค่าประมาณ

3) การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Assumption) พิจารณาได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับข้อมูล กราฟจะต้องมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม ดังรูปที่ 4.8 พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเป็นค่าบวกและลบอย่างสุ่ม ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับข้อมูล

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำที่ผลิตได้

จากการออกแบบการทดลองข้างต้น พบว่าสามารถใช้แบบจำลองนี้ในการหาความสัมพันธ์ได้ โดยผู้วิจัยจะใช้โปรแกรมมินิแทป (Minitab) วิเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.9

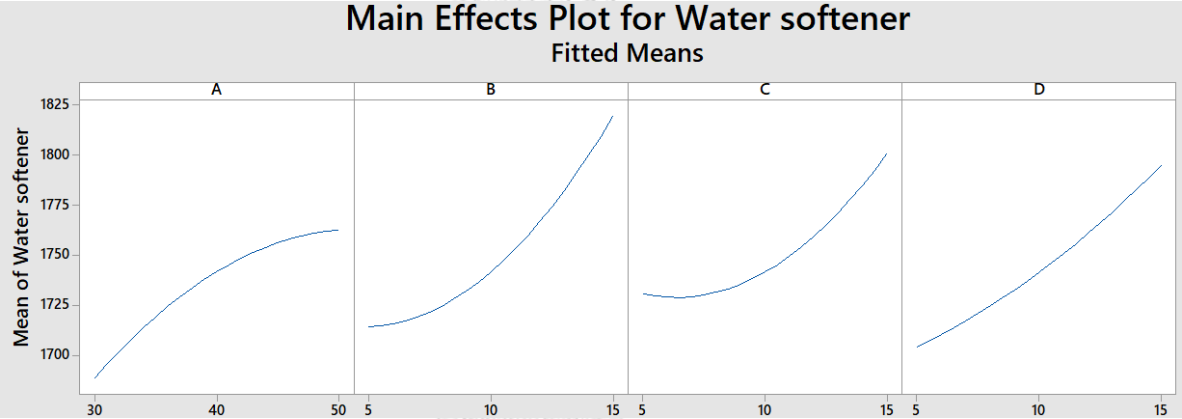
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	112571	8040.8	5.18	0.003
Linear	4	89633	22408.1	14.44	0.000
A	1	16502	16502.1	10.64	0.007
B	1	33496	33496.3	21.59	0.001
C	1	14700	14700.0	9.47	0.010
D	1	24934	24934.1	16.07	0.002
Square	4	10062	2515.4	1.62	0.232
A*A	1	1372	1372.5	0.88	0.365
B*B	1	3423	3422.8	2.21	0.163
C*C	1	3093	3093.4	1.99	0.183
D*D	1	338	337.8	0.22	0.649
2-Way Interaction	6	12876	2146.1	1.38	0.297
A*B	1	576	576.0	0.37	0.554
A*C	1	812	812.2	0.52	0.483
A*D	1	49	49.0	0.03	0.862
B*C	1	2601	2601.0	1.68	0.220
B*D	1	8836	8836.0	5.70	0.034
C*D	1	2	2.3	0.00	0.970
Error	12	18618	1551.5		
Lack-of-Fit	10	18466	1846.6	24.19	0.040
Pure Error	2	153	76.3		
Total	26	131189			

รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบ

จากผลของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบ พบว่าสมการความถดถอยที่ได้มีพจน์ที่มีนัยสำคัญได้แก่ พจน์ของอัตราการไหลเข้า (A) พจน์ของระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน (B) พจน์ของอัตราไหลในการล้างกลับ (C) ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (D) และพจน์ผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินกับความเข้มข้นของน้ำเกลือ (BD) สมการความถดถอยที่ได้ สามารถยอมรับได้เนื่องจากมีค่า R-sq 85.81 % แสดงว่าสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี

4.3.5 ผลกระทบหลักของปัจจัยนำเข้าต่อปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน

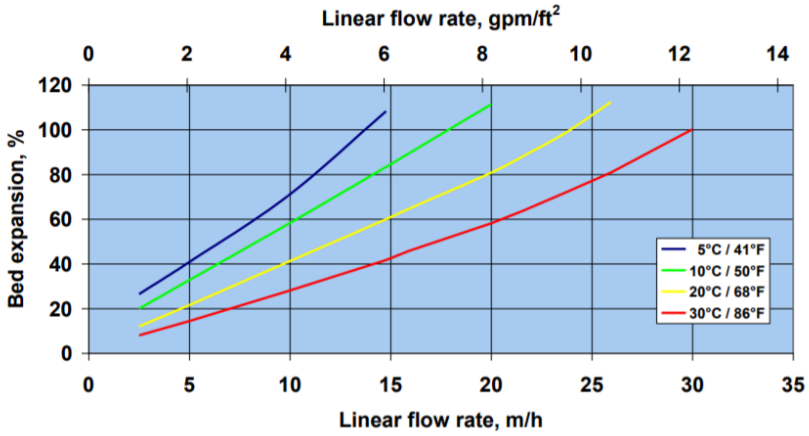


รูปที่ 4.10 ผลกระทบหลักของปัจจัยนำเข้าต่อปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน

จากรูปที่ 32 ผลกระทบหลักของปัจจัยนำเข้าต่อปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซินพบว่า เมื่ออัตราการไหลเข้า (A) เพิ่มขึ้นจากระดับต่ำไปกลาง จะทำให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซินเพิ่มมากขึ้น และจากกลางไปสูง จะทำให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซินเพิ่มมากขึ้นกว่าจากระดับต่ำไปกลาง เนื่องจากอัตราการไหลที่มากจะทำให้น้ำที่จะผ่านเรซินมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่น้อย ปริมาณไอออนที่ใช้แลกเปลี่ยนก็จะน้อย ทำให้เรซินสามารถผลิตน้ำอ่อนต่อรอบได้มากกว่า แต่ถ้าอัตราการไหลมากเกินไปจะมีผลเสียต่อเม็ดเรซินทำให้เสื่อมสภาพ หรือแตกได้

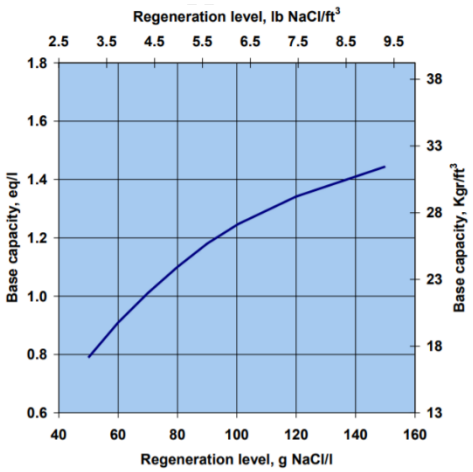
เมื่อระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน (B) เพิ่มจากระดับต่ำไปกลาง และจากกลางไปสูงจะทำให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซินเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินหมายถึงระยะเวลาที่เกลือสัมผัสกับเรซินในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ถ้าระยะเวลาในการฟื้นฟูมาก ตัวเรซินจะมีการแลกเปลี่ยนประจุได้มากทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำกระด้างมากกว่า เมื่ออัตราไหลในการล้างย้อน (C) เพิ่มจากระดับต่ำไปกลาง และจากกลางไปสูงจะทำให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อ

รอบเรซินเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการล้างย้อนมีหน้าที่ในการทำลายการจับตัวเป็นก้อนของเรซิน ช่วยให้เรซินเรียงตัวได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.11 ข้อมูลจากผู้ผลิตเรซินชนิด Purolite C100 พบว่าเมื่ออัตราการไหลล้างกลับมีมากขึ้นส่งผลให้การขยายตัวของเรซิน (Bed expension) เพิ่มมากขึ้น การฟื้นฟูสภาพเรซินก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งถ้าอัตราไหลการล้างย้อนมีน้อย จะทำให้เรซินเรียงตัวไม่ดีและทำให้การฟื้นฟูเรซินไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ความเข้มข้นของเกลือ (D) เมื่อเพิ่มจากระดับต่ำไปกลาง และจากกลางไปสูงจะทำให้ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซินเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณเกลือที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเรซินดีขึ้น ดังภาพที่ 4.12 โดยระดับการฟื้นฟูเรซิน (Regeneration level) หมายถึงปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ต่อปริมาตรเรซิน 1 ลิตร



รูปที่ 4.11 ข้อมูลอัตราการไหลของผู้ผลิต

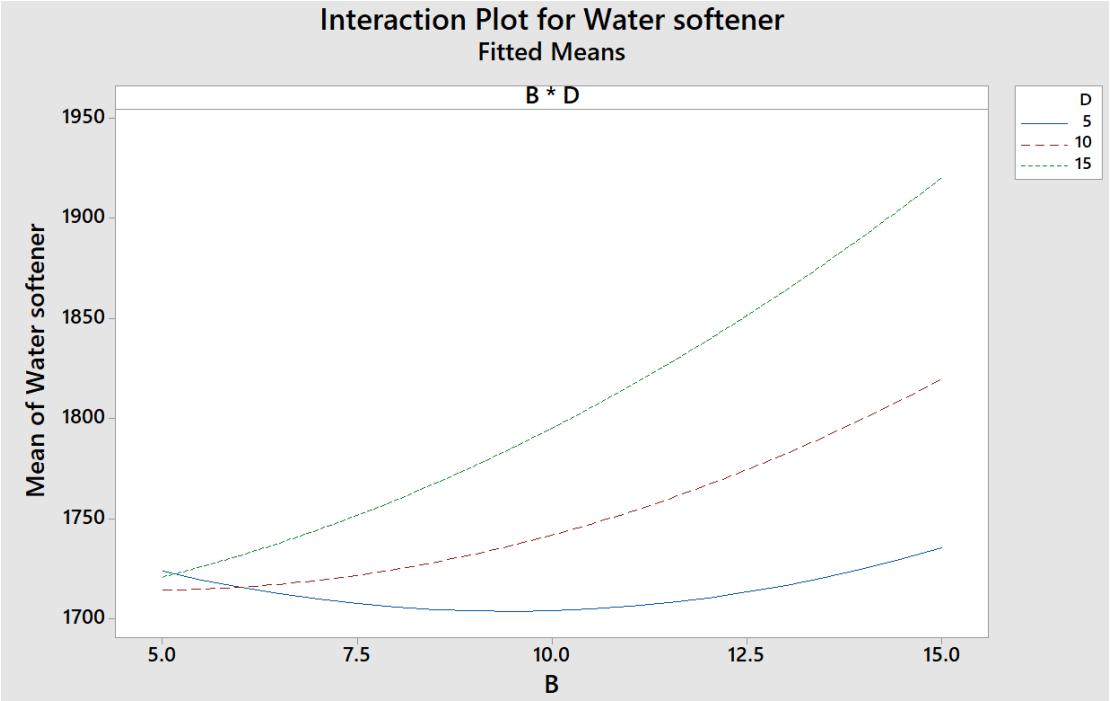
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULA



รูปที่ 4.12 ข้อมูลระดับการฟื้นฟูของผู้ผลิต

4.3.6 ผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน (B) กับความเข้มข้นของน้ำเกลือ (D)

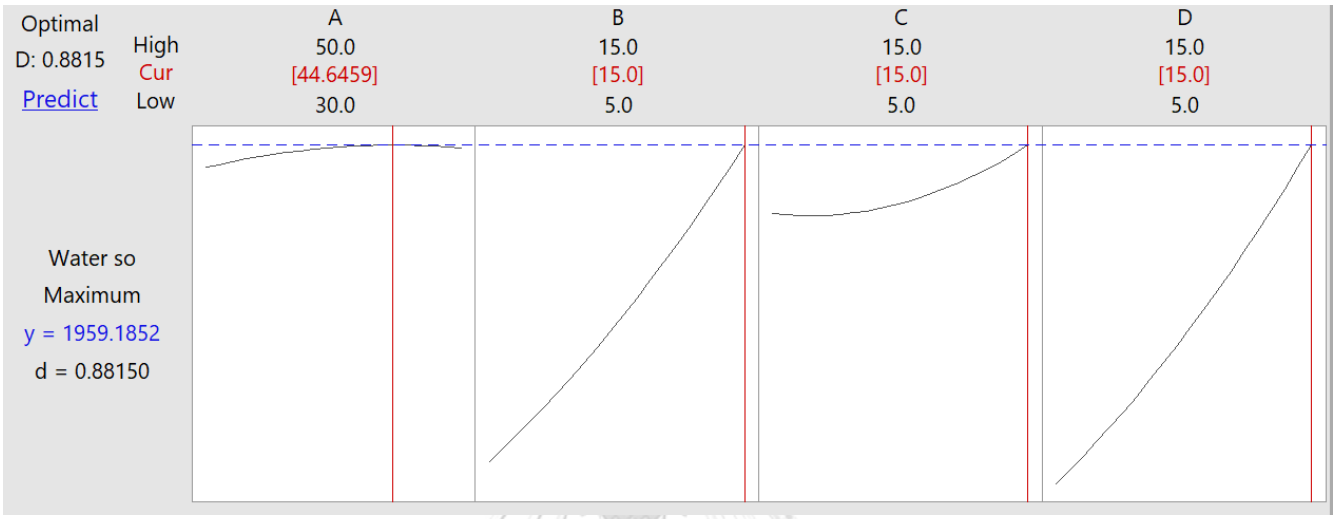
จากรูปที่ 4.13 ผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน (B) กับความเข้มข้นของน้ำเกลือ (D) เมื่อระยะเวลาการฟื้นฟูเรซินเปลี่ยนจากระดับต่ำไปกลาง และกลางไปสูง พบว่าความเข้มข้นของเกลือ (C) ที่ 15 % ให้อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตต่อรอบมากกว่าที่ 10 นาที ถ้าความเข้มข้นของเกลือที่ 5 % จะให้ปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบมากที่สุดที่ 5 หรือ 15 นาที



รูปที่ 4.13 ผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินกับความเข้มข้นของน้ำเกลือ

4.3.7 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า

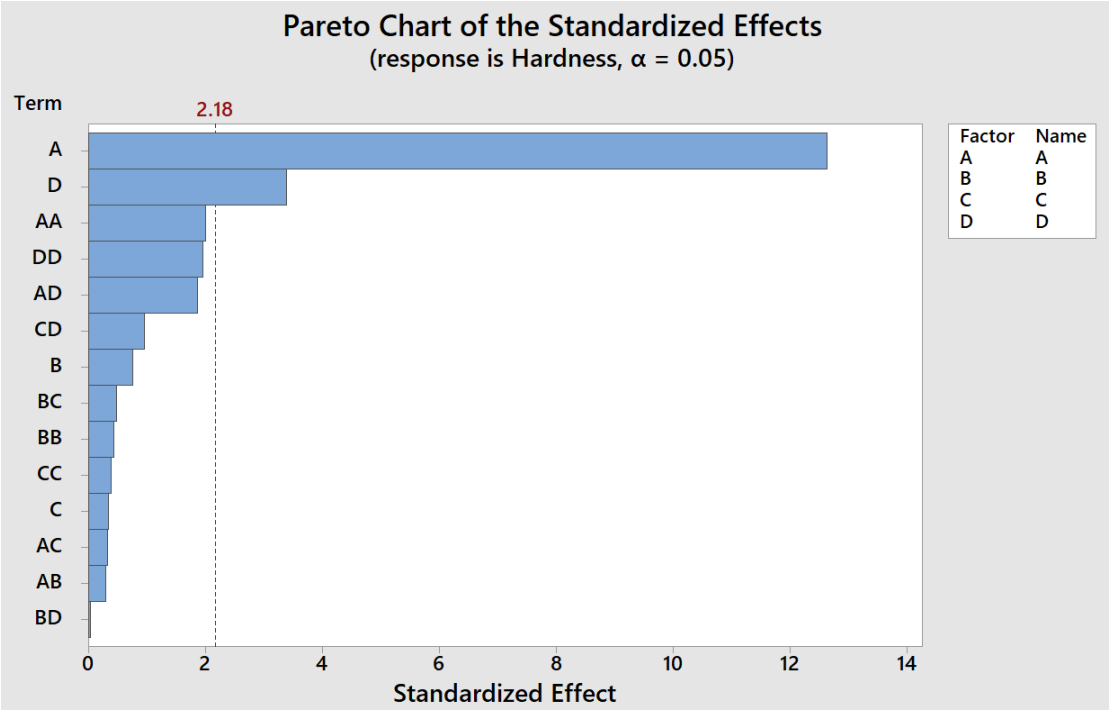
ภายหลังจากได้สมการความถดถอยที่ยอมรับได้แล้ว จะเป็นการหาตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมมินิแทป (Minitab) ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้คือความกระด้างของน้ำมีค่าเป็น 0 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

4.3.8 ผลของตัวแปรต้นต่อค่าความกระด้างของน้ำ (Hardness)

แม้ว่าการปรับปรุงตามการออกแบบการทดลองข้างต้นจะให้ปริมาณน้ำต่อรอบเรซินที่มากขึ้น แต่คุณภาพน้ำที่ได้ออกมาจะได้คุณภาพน้ำที่ต่ำกว่าเกณฑ์ จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความกระด้างของน้ำต่อ พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความกระด้างของน้ำอย่างมีนัยสำคัญคือ อัตราการไหลเข้า (ตัวแปร A) และความเข้มข้นของเกลือ (ตัวแปร D) ตามรูปที่ 4.15 ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาความกระด้างที่ได้



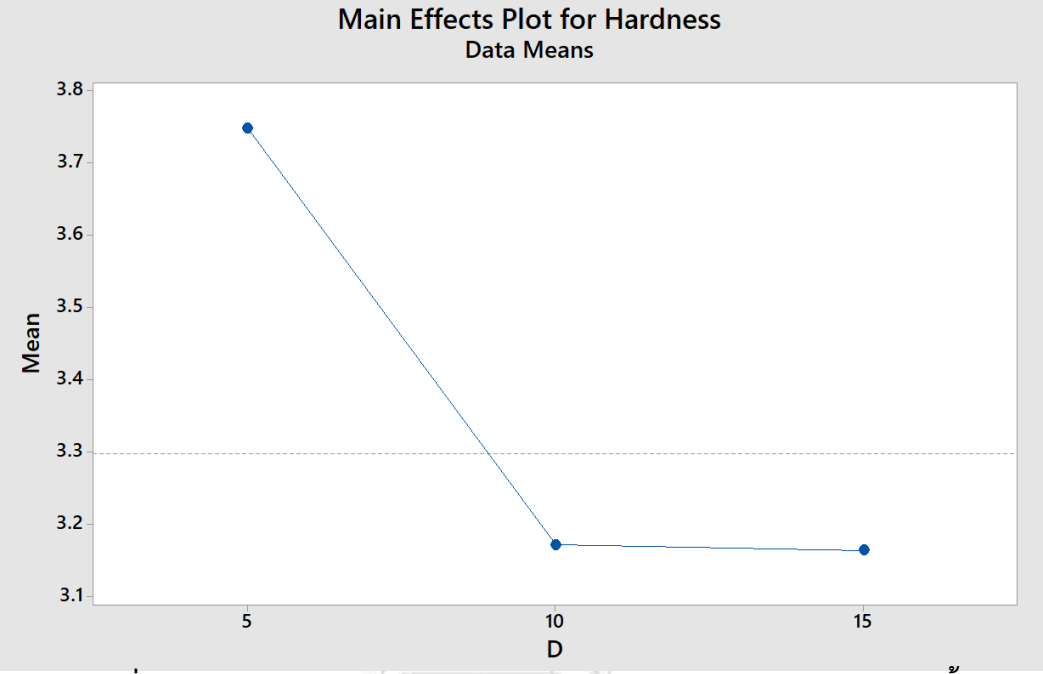
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าความกระด้างของน้ำ

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าความเข้มของเกลือกับความกระด้างของน้ำและปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน

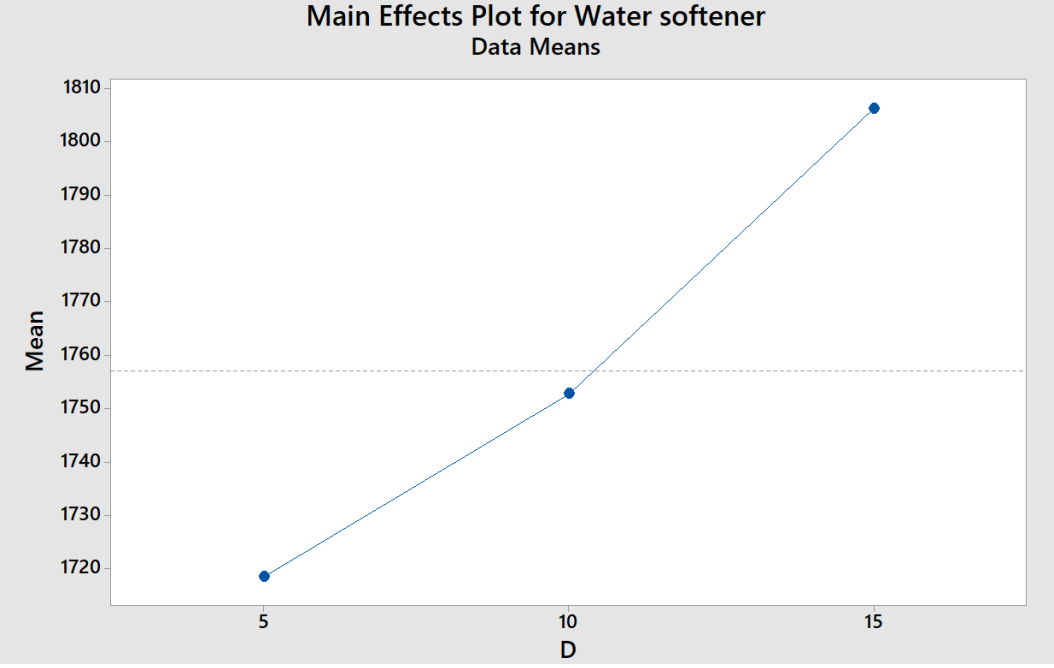
1) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับความกระด้างของน้ำและปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน

จากการทดลองปรับค่าความเข้มข้นของเกลือเพื่อศึกษาความกระด้างของน้ำและปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซินพบว่าความเข้มข้นของเกลือที่ 15% จะให้ค่าความกระด้างของน้ำน้อยที่สุดและให้ค่าปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซินมากที่สุด ดังรูปที่ 38 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับความกระด้างของน้ำ และรูปที่ 39 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน ดังนั้นในการปรับตั้งพารามิเตอร์ความเข้มข้นของเกลือจะปรับตั้งที่ 15 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



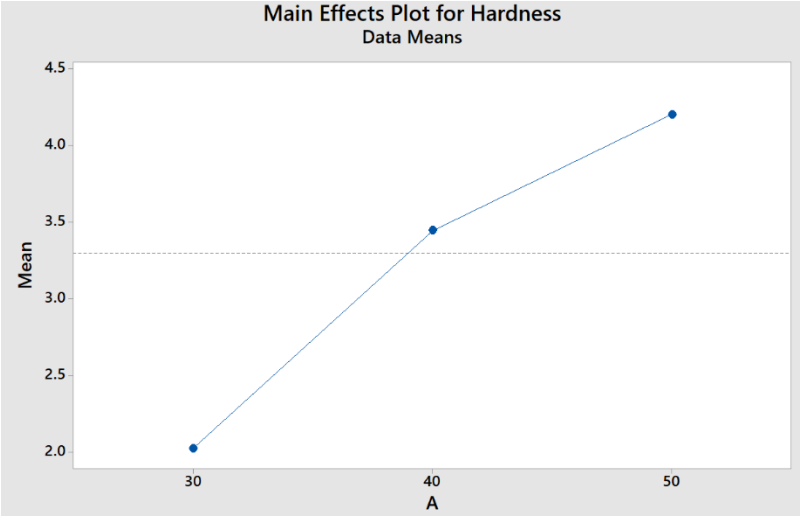
รูปที่ 4.16 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับความกระด้างของน้ำ



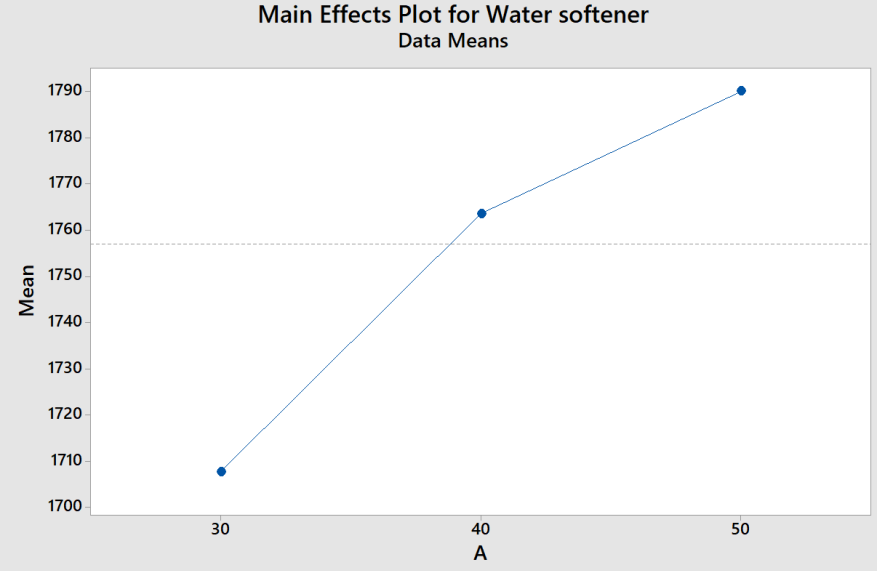
รูปที่ 4.17 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน

2) การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความกระด้างของน้ำกับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน

จากการทดลองปรับค่าอัตราการไหลเข้าเพื่อศึกษาความกระด้างของน้ำและปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซินพบว่าเมื่ออัตราการไหลมากความกระด้างของน้ำและปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซินจะมาก ดังรูปที่ 4.18 อิทธิพลหลักระหว่างอัตราการไหลกับความกระด้างของน้ำ และรูปที่ 4.19 อิทธิพลหลักระหว่างอัตราการไหลกับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน



รูปที่ 4.18 อิทธิพลหลักระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับความกระด้างของน้ำ



รูปที่ 4.19 อิทธิพลหลักระหว่างอัตราการไหลเข้ากับปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซิน

จากอิทธิพลของอัตราการไหลเข้าต่อความกระด้างของน้ำและปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบเรซินให้ผลในทางตรงกันข้าม ดังนั้นจำเป็นจะต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งแนวทางในการหาค่าที่เหมาะสมตามโปรแกรมมินิแทป (Minitab) อาจจะให้ค่าที่คลาดเคลื่อน เนื่องจากความกระด้างของน้ำก่อนเข้าถังน้ำอ่อนมีค่าไม่คงที่ ทำให้ต้องศึกษาการเปลี่ยนอัตราการไหลต่อความกระด้างของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้ากับปริมาณความกระด้างที่เปลี่ยนไป

ทำการทดลองโดยให้ครอบคลุมความกระด้างของน้ำขาเข้าให้มากที่สุด จากสถิติข้อมูลน้ำกระด้างขาเข้าที่ค่าอยู่ที่ 110-85 mg/l as $CaCO_3$ การทดลองเพิ่มเติมได้กำหนดปัจจัยควบคุมตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปัจจัยควบคุม

ลำดับที่	ปัจจัย	ค่าที่ปรับตั้ง	หน่วย
1	ความเข้มข้นของเกลือ	15	%
2	ระยะการฟื้นฟูเรซิน	15	นาที
3	อัตราการไหลล้างกลับ	15	ลิตร/นาที

ผลของการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลเข้าน้อยลงมีผลให้ %การลดลงของความกระด้างมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลเข้ามากขึ้นมีผลให้ %การลดลงของความกระด้างมีลดลง ดังตารางที่ 4.5 สามารถสรุป %การลดลงของความกระด้างโดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับอัตราการไหลเข้าถังน้ำอ่อนได้ดังตารางที่ 4.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการปรับอัตราการไหลเข้าถังน้ำอ่อน

NO	อัตราการไหลเข้า (ลบ.ม./ชม.)	ความกระด้างเข้าถังน้ำอ่อน (mg/l as $CaCO_3$)	ความกระด้างออกจากถังน้ำอ่อน (mg/l as $CaCO_3$)	% การลดลงของความกระด้าง
1	20	93.8	0.8	99.15
2	20	96.5	1.1	98.86
3	20	105.6	0.3	99.72
4	20	101.4	1.4	98.62
5	30	98.9	1.8	98.18
6	30	96	1.2	98.75
7	30	94.3	1.4	98.52
8	30	95.1	1.1	98.84
9	40	106.2	3.6	96.61
10	40	91	3.8	95.82
11	40	92.3	3.5	96.21
12	40	94	3.1	96.70
13	50	100.1	15.4	90.62
14	50	92.7	14.6	89.67
15	50	93.6	13.4	87.30
16	50	91.1	11.3	91.60
17	60	103.9	22.5	78.34
18	60	101.4	21.6	78.70
19	60	89.2	24.2	72.87
20	60	95.4	26.7	72.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้ากับค่าเฉลี่ย %การลดลงของความกระด้าง

NO	อัตราการไหลเข้า (ลบ.ม./ชม.)	% การลดลงของความกระด้าง
1	20	99.09
2	30	98.57
3	40	97.04
4	50	92.80
5	60	75.48

ฉะนั้นการคำนวณการปรับตั้งพารามิเตอร์อัตราการไหลเข้าจะคิดจากค่าความกระด้างของน้ำขาเข้าถังน้ำอ่อนมากที่สุดคูณกับ %การลดลงของความกระด้าง ให้ได้ค่าความกระด้างออกจากถังน้ำอ่อนที่ไม่เกินมาตรฐาน คือ 5 mg/l as $CaCO_3$ ได้ค่าพารามิเตอร์อัตราการไหลเข้าคือ 42 ลบ.ม./ชม. สรุปผลการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ค่าเดิม	ค่าที่ปรับตั้งใหม่	หน่วย
A	อัตราการไหลเข้า	40	42	ลบ.ม./ชม.
B	ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน	10	15	นาที
C	อัตราการไหลในการล้างกลับ	10	15	ลิตร/นาที
D	ความเข้มข้นน้ำเกลือ	10	15	%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
การทดสอบและยืนยันผล

ในบทนี้จะเป็นการทดสอบการปรับพารามิเตอร์ หรือปัจจัยนำเข้าที่ได้จากการค่าหาที่เหมาะสมจากการทดลองในบทที่ 4 เพื่อเป็นการทดสอบและยืนยันผลว่าหลังจากการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถทำให้ปริมาณน้ำที่ผลิตได้ต่อรอบเรซินมีนัยสำคัญหรือไม่ และคุณภาพน้ำต้องไม่เกินมาตรฐานของโรงงาน โดยจะใช้การทดสอบสมมติฐานในการทดสอบผล

5.1 ขั้นตอนในการทดสอบเพื่อยืนยันผล

ก่อนการทดสอบเพื่อยืนยันผล ผู้วิจัยได้ประชุมเพื่อชี้แจงขั้นตอนในการดำเนินงาน เนื่องจากมีการปรับปรุงพารามิเตอร์เครื่องจักร และมีการปรับปรุงระบบการทำงานของเครื่องจักร จากเดิมที่พนักงานจะต้องไปที่หน้างาน เปลี่ยนมาเป็นดูแลเครื่องจากผ่านหน้าจอ HMI (Human machine interface) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. จัดเตรียมน้ำเกลือตามพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง ตามตารางที่ 5.1
2. ปรับตั้งระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน (Regeneration) ที่หน้าจอ
3. บันทึกปริมาณน้ำที่ผลิตได้ ปริมาณน้ำเกลือและปริมาณน้ำล้างที่ใช้
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ค่าระดับปัจจัยในการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัย	ค่าระดับปัจจัย	หน่วย
1	อัตราการไหลเข้า	42	ลบ.ม./ชม.
2	ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน	15	นาที
3	อัตราการไหลในการล้างกลับ	15	ลิตร/นาที
4	ความเข้มข้นน้ำเกลือ	15	%

CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล โดยการเก็บตัวอย่างข้อมูลได้ทั้งหมด 15 รอบเรซิน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองหลังจากการปรับพารามิเตอร์

รอบที่	ช่วงปรับสภาพเรซิน				ช่วงการผลิตน้ำอ่อน		
	อัตราการไหลเข้าถังน้ำอ่อน (ลบ.ม./ชม.)	ค่าความกระด้างน้ำขาเข้า(mg/l as $CaCO_3$)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ปริมาณน้ำที่ใช้ฟื้นฟูเรซิ่น (ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำที่ผลิตได้ (ลบ.ม.)	ค่าความกระด้างที่ได้ (mg/l as $CaCO_3$)	Conductivity (µs/cm)
1	42	90.7	80	10.2	2018	3.6	4.1
2	42	95.1	80	10.2	1997	3.8	4.5
3	42	96.0	80	10.2	1982	3.9	4.5
4	42	96.2	80	10.2	2011	3.6	4.2
5	42	101.5	80	10.2	1987	3.9	4.6
6	42	104.1	80	10.2	1965	4.2	5.1
7	42	95.6	80	10.2	2001	3.6	4.1
8	42	91.7	80	10.2	2004	3.6	4.2
9	42	97.4	80	10.2	1993	3.8	4.6
10	42	98.3	80	10.2	1989	3.8	4.6
11	42	104.8	80	10.2	1974	4.1	4.9
12	42	91.9	80	10.2	1993	3.7	4.4
13	42	97.2	80	10.2	1989	3.9	4.6
14	42	96.2	80	10.2	1980	3.8	4.5
15	42	90.8	80	10.2	2007	3.4	4.1

5.3 การทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

จากผลการทดลองตามตารางที่ 5.2 จะนำมาใช้ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงกระบวนการ โดยตัวอย่างทั้งหมด 15 ตัวอย่างดังตารางที่ 5.3 สามารถใช้การทดสอบสมมติฐานได้ ดังนี้

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

รอบที่	ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่นก่อนการปรับปรุง (ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่นหลังการปรับปรุง (ลบ.ม.)
1	1656	2018
2	1601	1997
3	1714	1982
4	1723	2011
5	1698	1987
6	1688	1965
7	1620	2001
8	1621	2004
9	1692	1993
10	1680	1989
11	1692	1974
12	1731	1993
13	1726	1989
14	1711	1980
15	1670	2007

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กำหนด μ_1 = ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบของน้ำ หลังการปรับปรุง ,

μ_2 = ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบของน้ำ ก่อนการปรับปรุง

ตั้งสมมติฐาน $H_0 = \mu_1 - \mu_2 = 0$

$H_1 = \mu_1 - \mu_2 > 0$

Two-Sample T-Test and CI: หลังปรับปรุง, ก่อนปรับปรุง

Method

μ_1: mean of ปริมาณน้ำอ่อนหลังปรับปรุง

μ_2: mean of ปริมาณน้ำอ่อนก่อนปรับปรุง

Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are not assumed for this analysis.

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
ปริมาณน้ำอ่อนหลังปรับปรุง	15	1992.7	14.3	3.7
ปริมาณน้ำอ่อนก่อนปรับปรุง	15	1681.5	40.8	11

Estimation for Difference

Difference	95% Lower Bound for Difference
311.1	291.7

Test

Null hypothesis	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$

T-Value	DF	P-Value
27.87	17	0.000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
HULALONGKORN UNIVERSITY

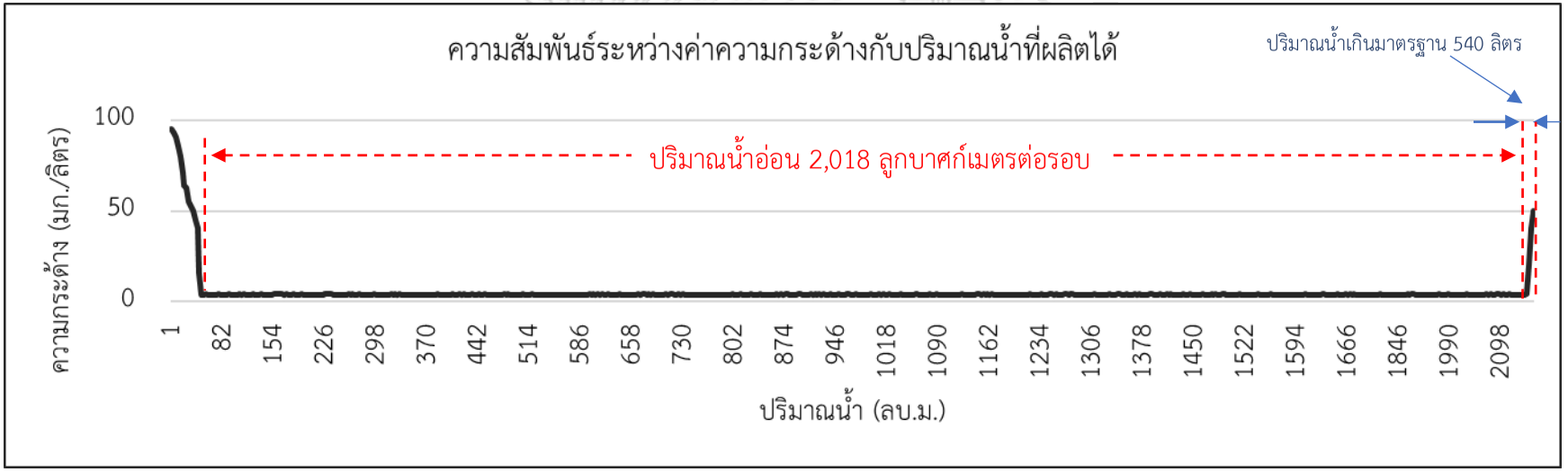
รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

จากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ฉะนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยความกระด้างของน้ำหลังการปรับปรุงกระบวนการ มีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

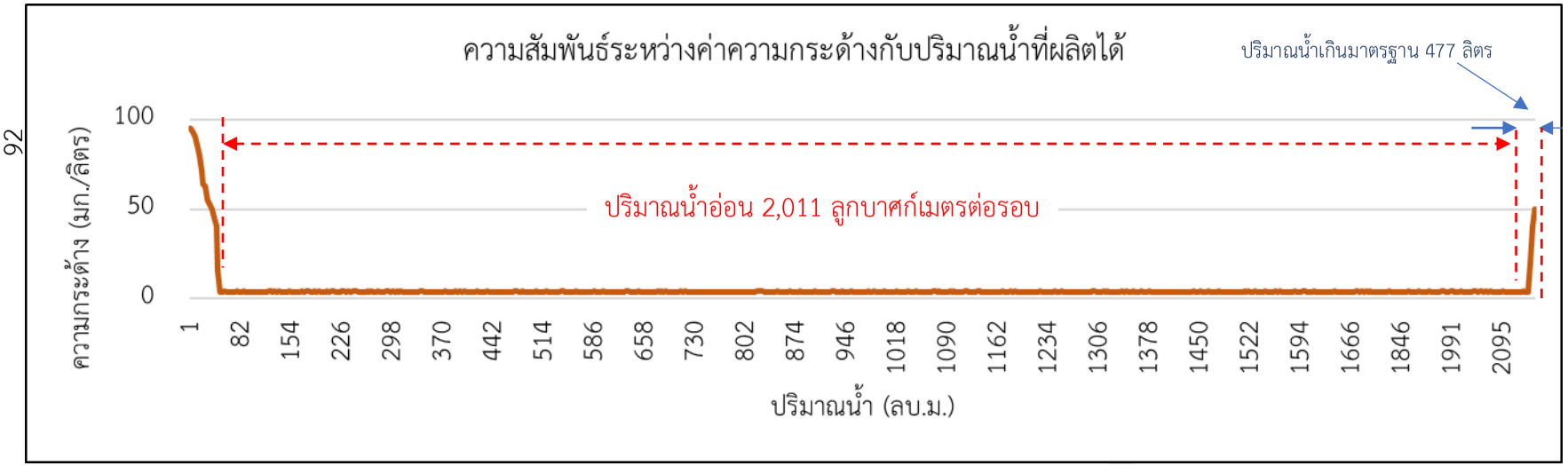
5.4 ผลการทดลองการตรวจวัดค่าความกระด้างเกินมาตรฐาน

หลังจากปรับปรุงการแจ้งเตือนการเสื่อมสภาพของเรซิ่นตามหัวข้อที่ 4.2 ผู้วิจัยได้ทดลองระบบการแจ้งเตือนการเสื่อมสภาพเรซิ่น โดยการแจ้งเตือนดังรูปต่อไปนี้

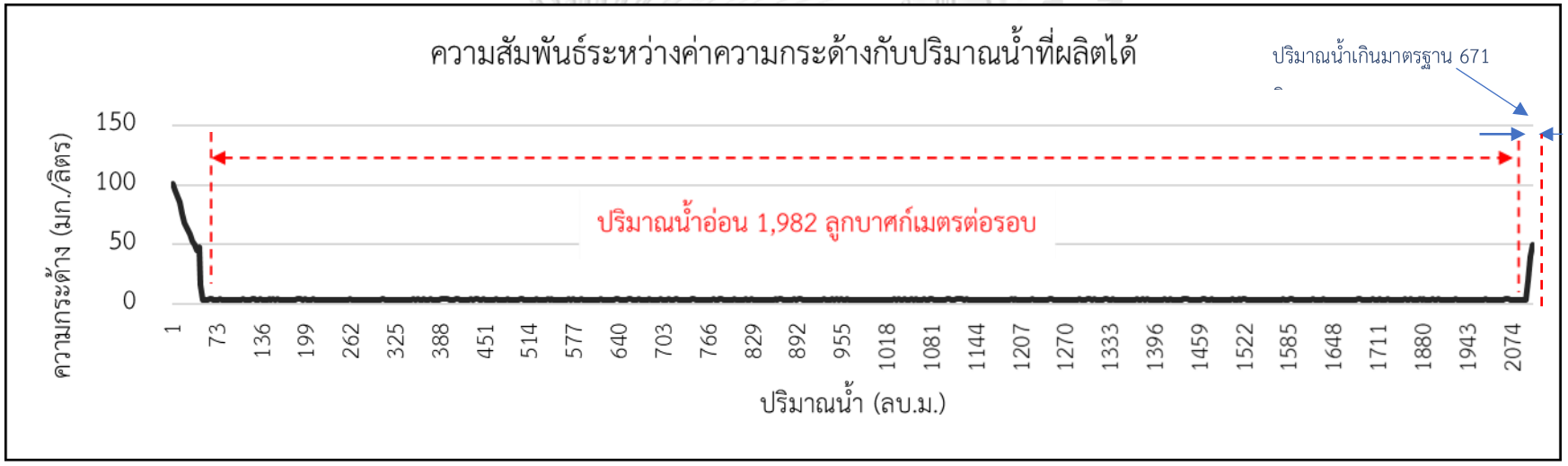
รูปที่ 5.3 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 2



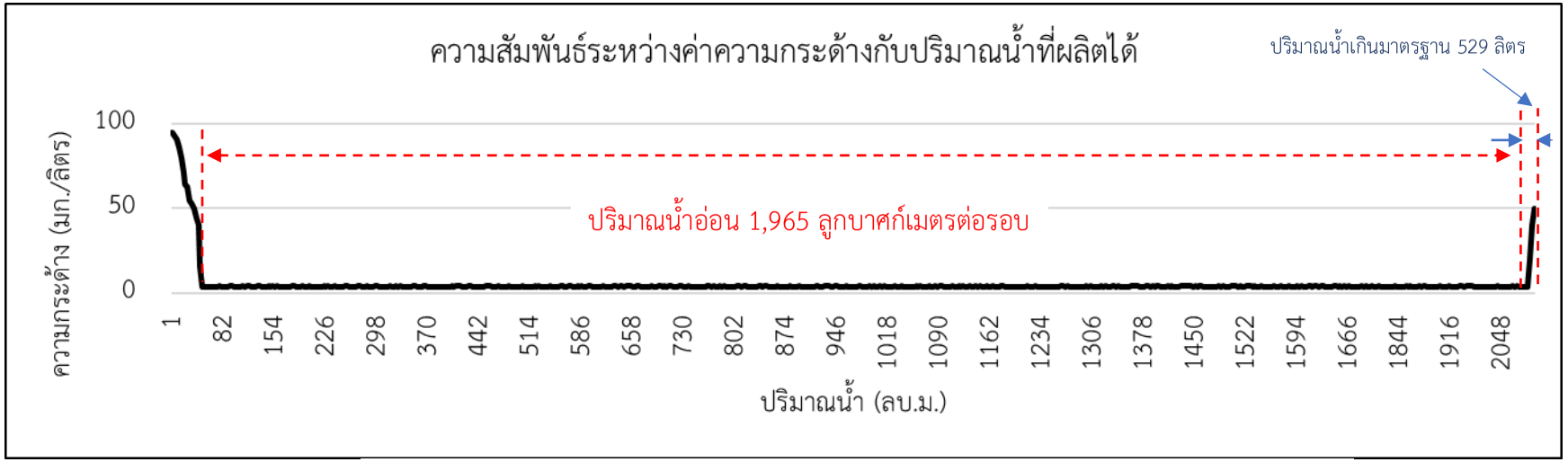
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 1



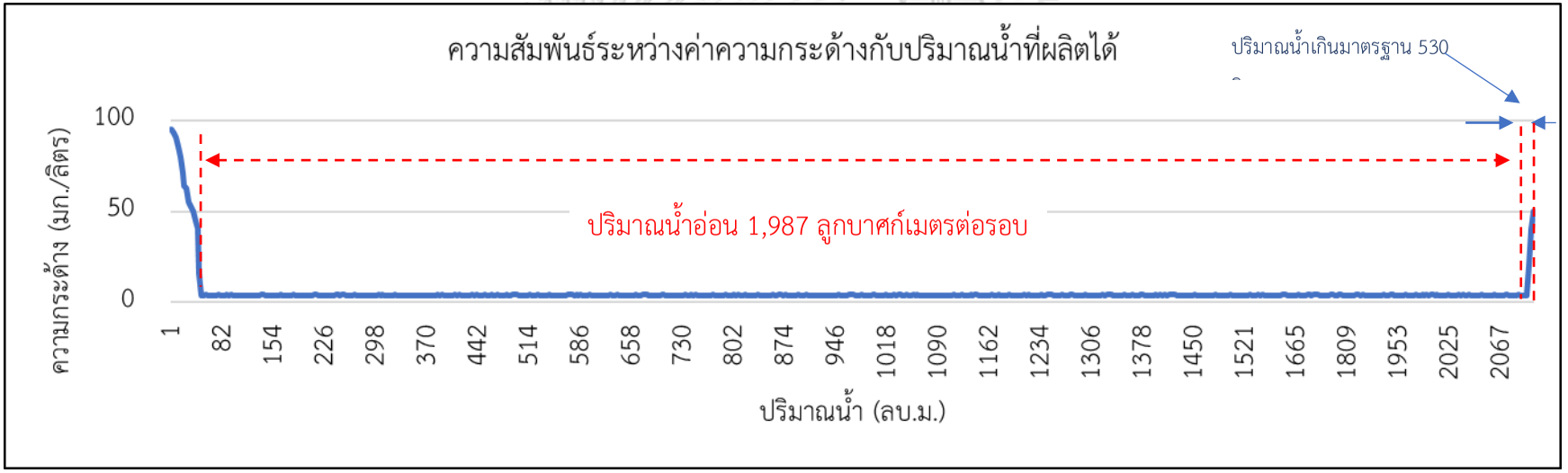
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 4



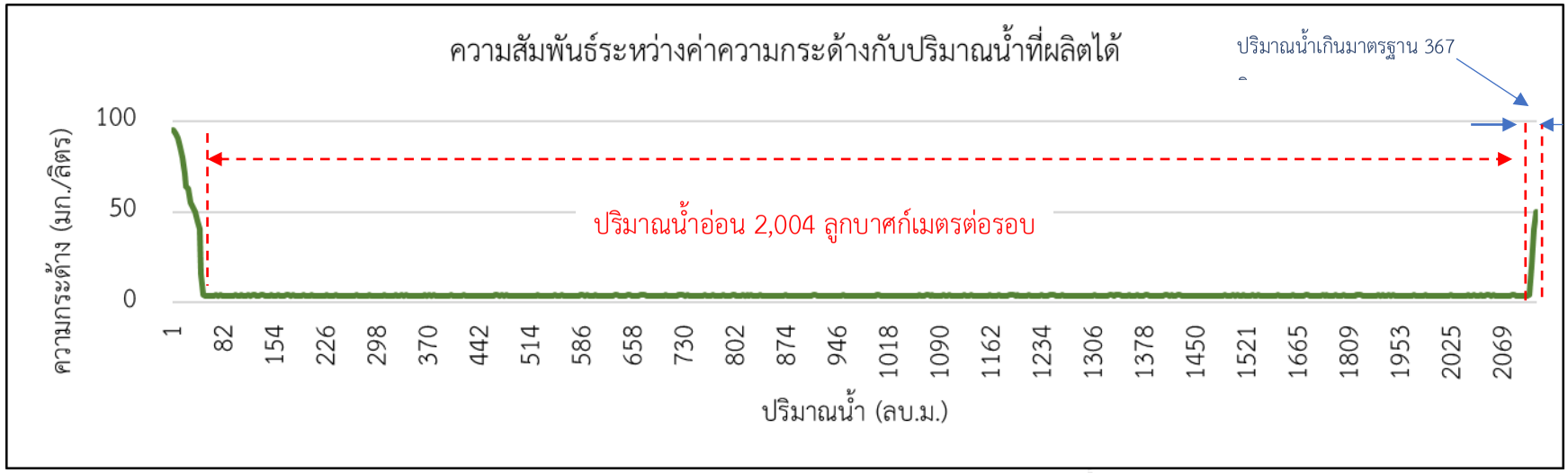
รูปที่ 5.5 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 3



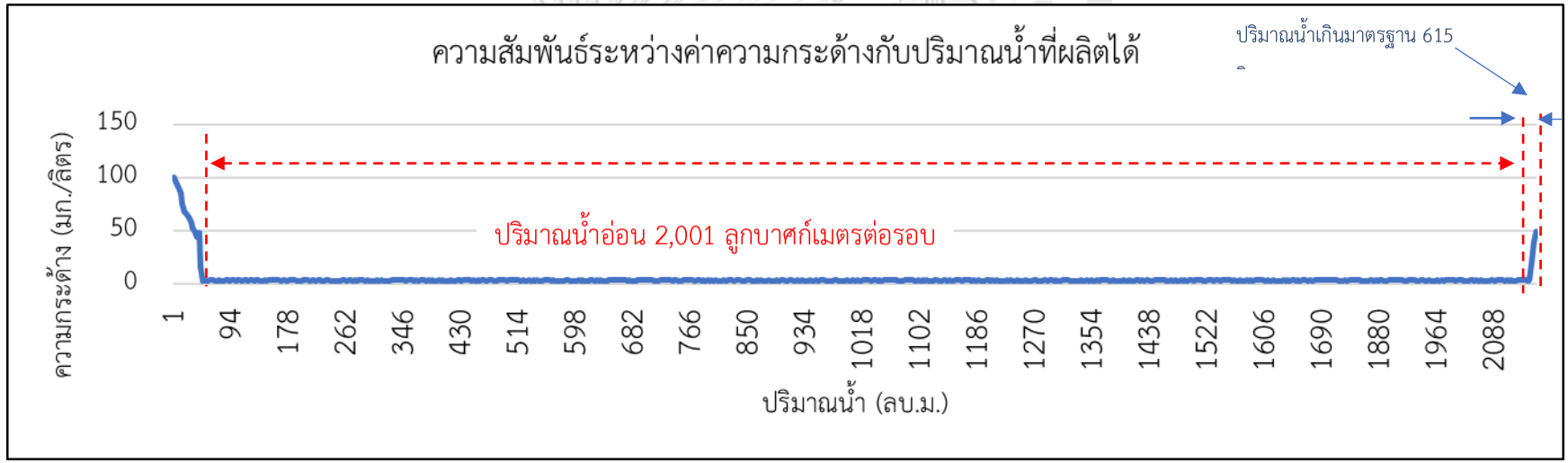
รูปที่ 5.7ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 6



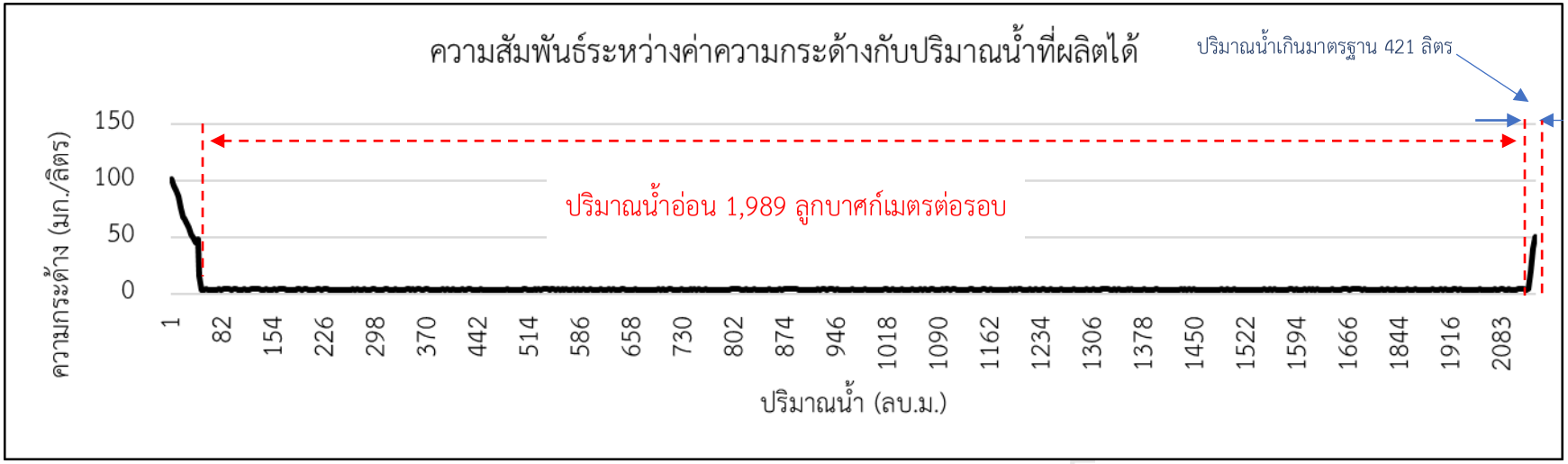
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 5



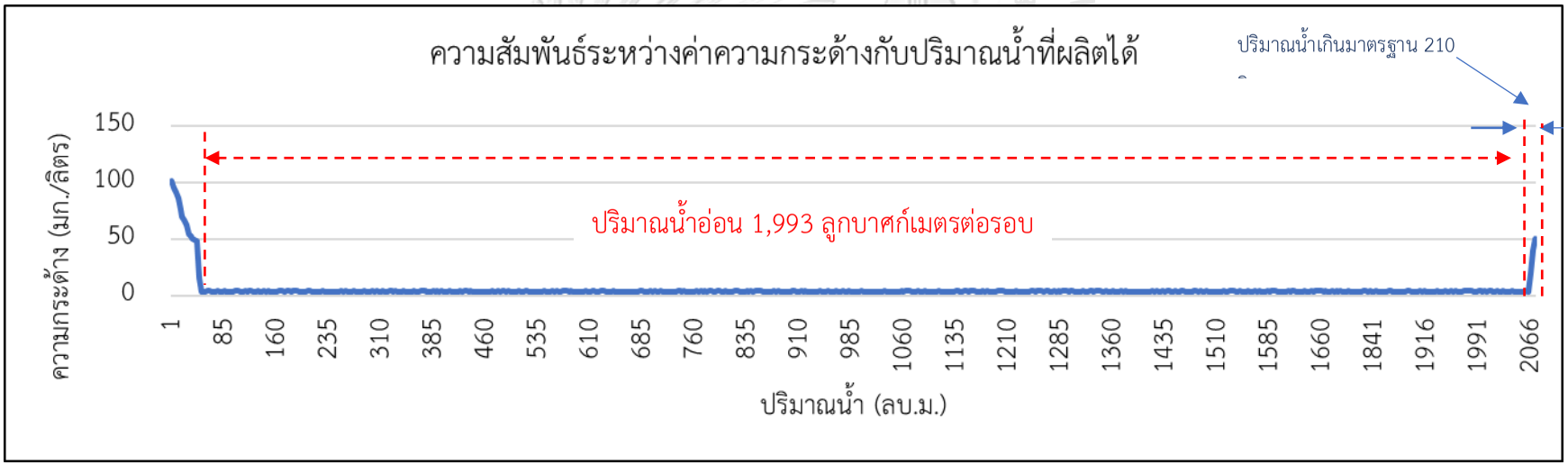
รูปที่ 5.9 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 8



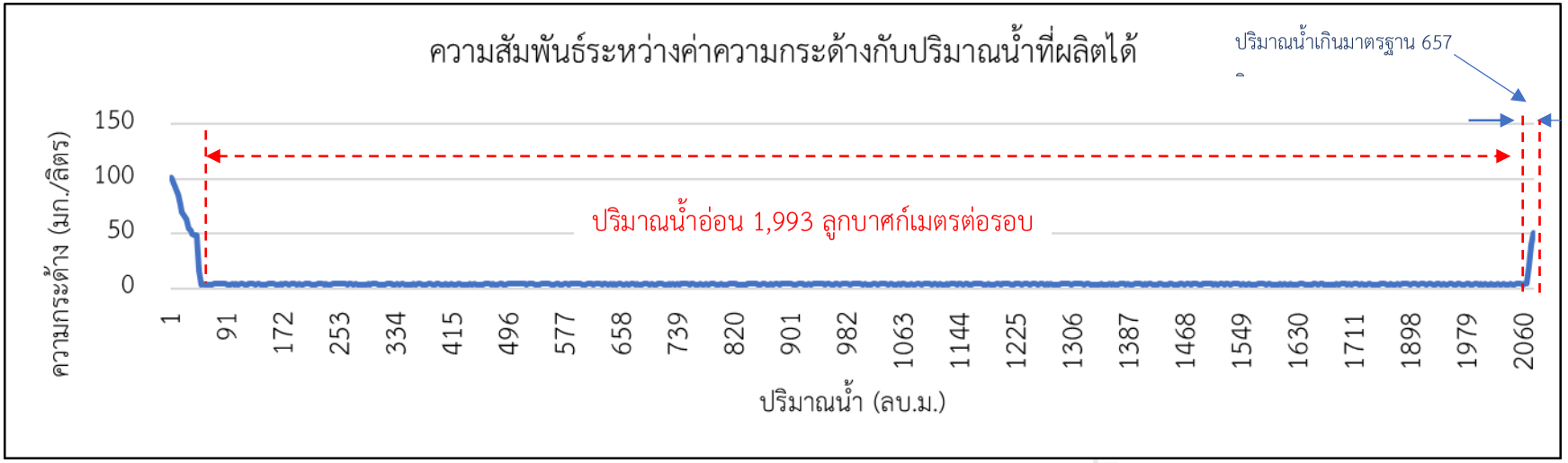
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 7



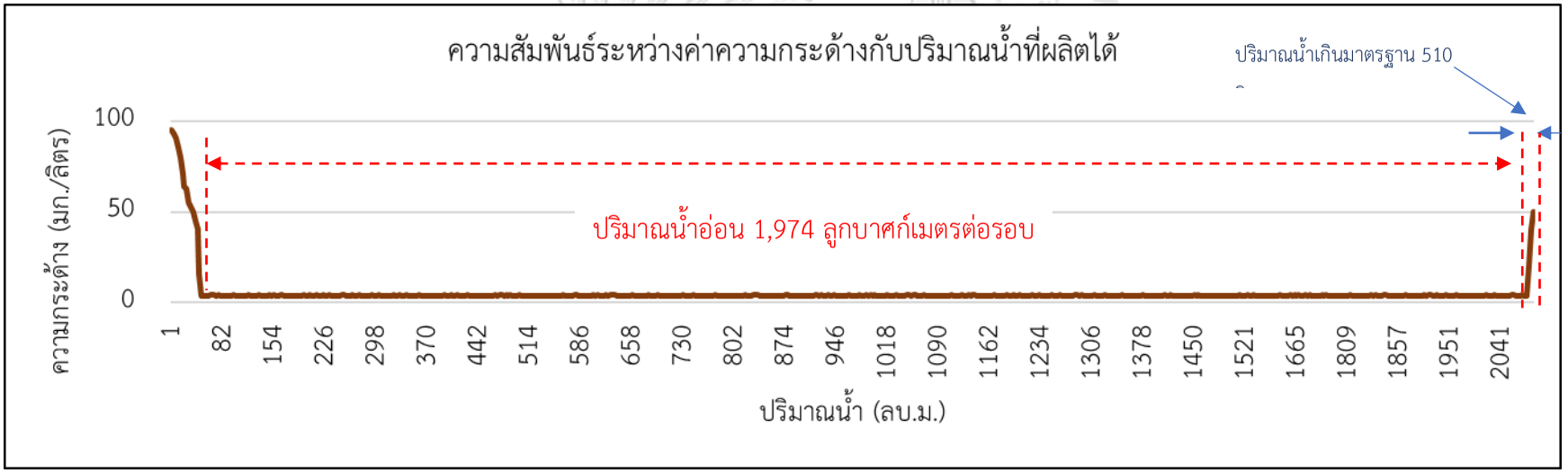
รูปที่ 5.11 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 10



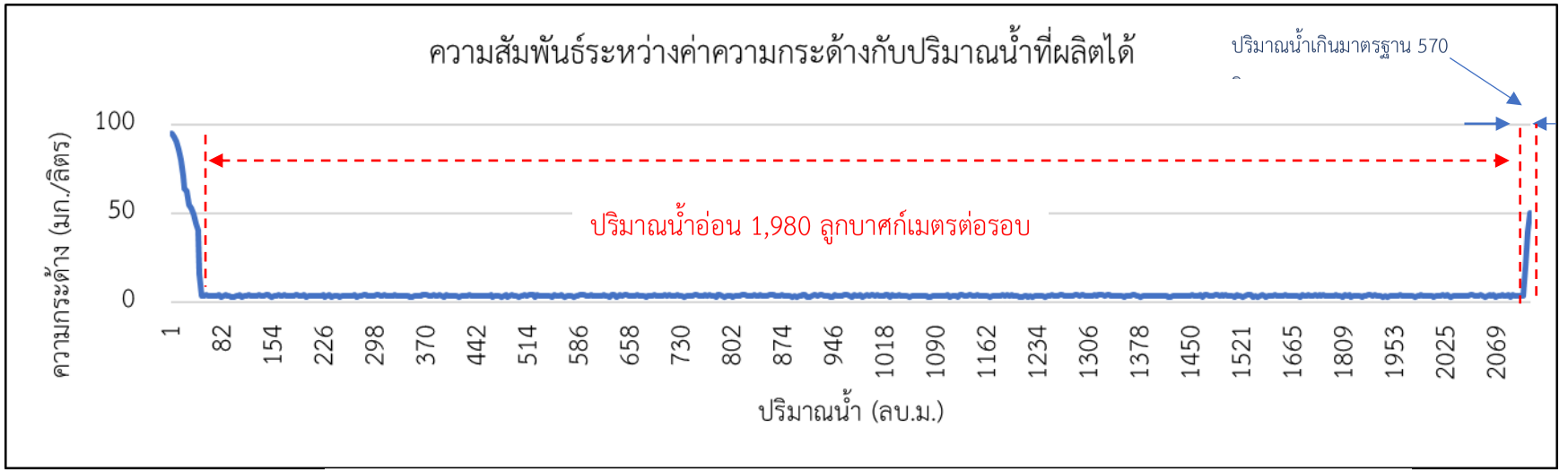
รูปที่ 5.10 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 9



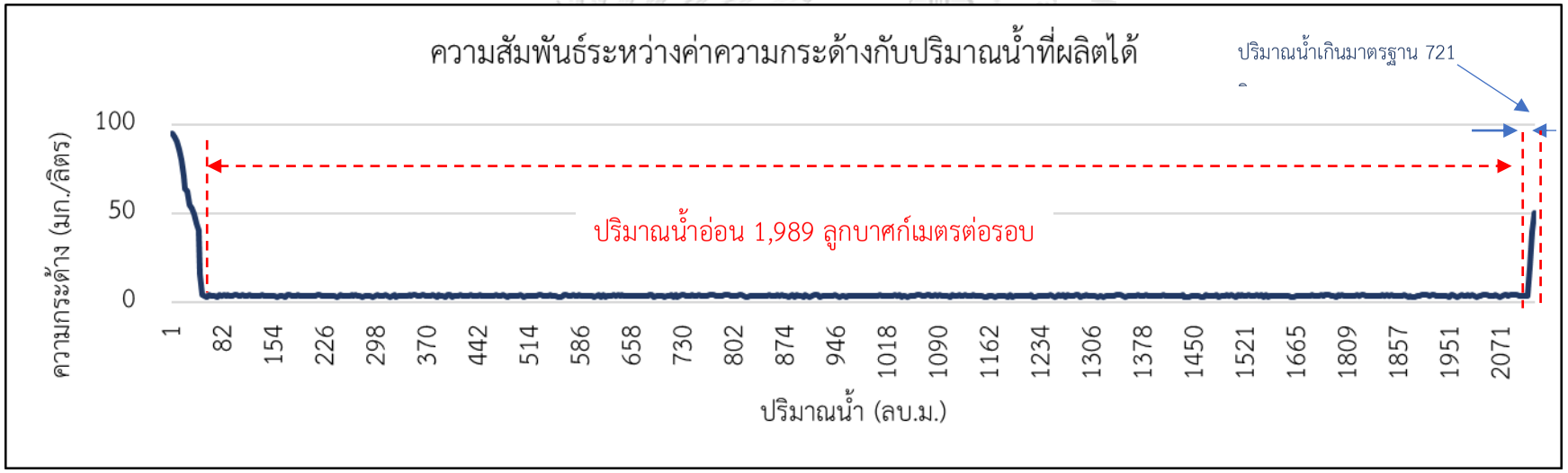
รูปที่ 5.12 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 12



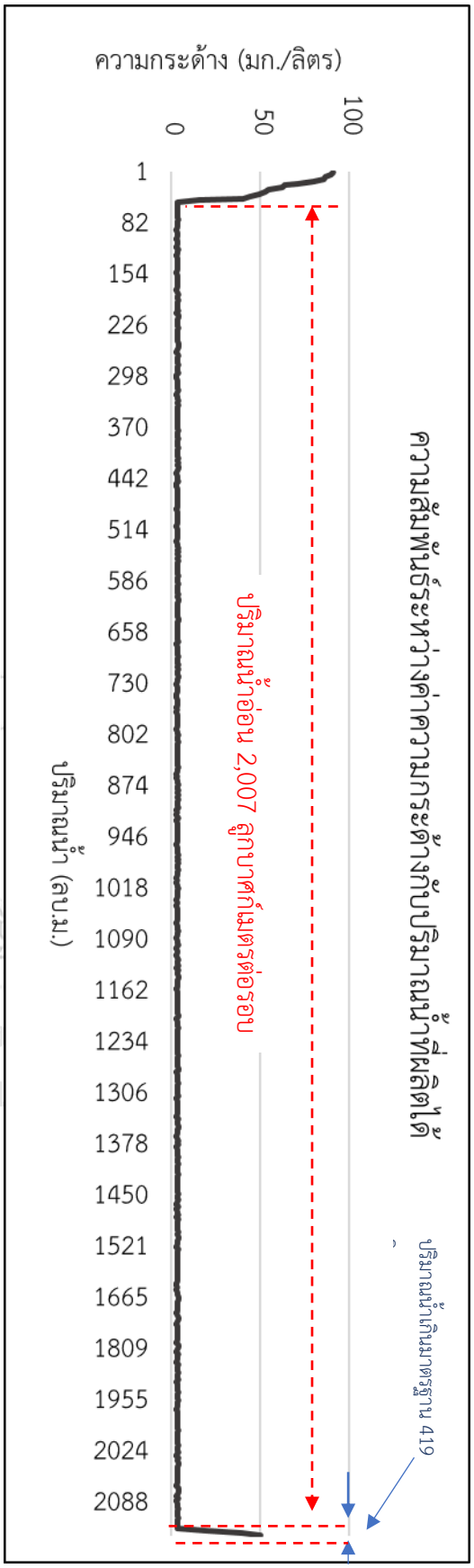
รูปที่ 5.13 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 11



รูปที่ 5.15 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 14



รูปที่ 5.14 ผลการทดลองการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 13



รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบการตรวจวัดความกระด้างจากเครื่อง Hardness analyzer รอบที่ 15

จากรูป 5.2 ถึง 5.16 จะนำมาใช้การแจ้งเตือนเรซิ่นเสื่อมสภาพ เมื่อสุ่มค่าความกระด้างได้เกิน 5.0 mg/l as $CaCO_3$ จำนวน 15 ตัวอย่างต่อเนื่องกันระบบน้ำอ่อนจะทำการฟื้นฟูสภาพเรซิ่นโดยอัตโนมัติ แต่ปริมาณน้ำที่เกินมาตรฐานยังมีออกจากระบบบ อันเนื่องมาจากการตั้งค่าการสุ่มตรวจ (Sampling rate) ของเครื่องวัดความกระด้าง (Hardness analyzer) ตั้งค่าไว้ที่ 30 วินาที ทำให้ตัวควบคุมรับค่าจากเครื่องวัดแต่ละค่าช้าไป 30 วินาที ประกอบกับโปรแกรมการฟื้นฟูเรซิ่นอัตโนมัติ มีการกำหนดการป้องกันฟื้นฟูเรซิ่นผิดพลาด (Interlock) โดยจากรูปข้างต้นจะทำการฟื้นฟูเมื่อกราฟมีลักษณะชันขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นทำงานเมื่อสุ่มค่าที่เกินมาตรฐานต่อเนื่อง 5 ค่าถึงจะทำการฟื้นฟูอัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้ทำให้มีปริมาณน้ำที่เกินมาตรฐานออกจากระบบได้ โดยผลการตรวจวัดปริมาณน้ำกระด้างที่เกินมาตรฐานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงแสดงดังตารางที่ 5.4 ค่าปริมาณน้ำที่เกินมาตรฐานก่อนการปรับปรุงจะวัดจากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านท่อน้ำทิ้ง เนื่องจากก่อนการปรับปรุงยังไม่ติดตั้งเครื่องวัดความกระด้าง

ตารางที่ 5.4 ปริมาณน้ำกระด้างที่เกินมาตรฐานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

รอบที่	ปริมาณน้ำที่เกินมาตรฐานก่อนการปรับปรุง (ลิตร)	ปริมาณน้ำที่เกินมาตรฐานหลังการปรับปรุง (ลิตร)
1	4,870	540
2	4,450	289
3	3,746	671
4	3,780	477
5	4,461	530
6	4,850	529
7	4,730	615
8	4,460	367
9	5,670	210
10	4,620	421
11	3,631	510
12	4,743	657
13	4,320	721
14	4,752	570
15	3,467	419

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการทดลองตามตารางที่ 5.4 จะนำมาใช้ทดสอบความแตกต่างของปริมาณน้ำที่เกินมาตรฐานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงกระบวนการ โดยตัวอย่างทั้งหมด 15 ตัวอย่างดังรูปที่ 5.17

กำหนด μ_1 = ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอ่อนเกินมาตรฐาน หลังการปรับปรุง ,

μ_2 = ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอ่อนเกินมาตรฐาน ก่อนการปรับปรุง

ตั้งสมมติฐาน $H_0 = \mu_1 - \mu_2 = 0$

$H_1 = \mu_1 - \mu_2 < 0$

Two-Sample T-Test and CI: หลังปรับปรุง, ก่อนปรับปรุง

Method

μ_1: mean of หลังปรับปรุง

μ_2: mean of ก่อนปรับปรุง

Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are not assumed for this analysis.

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
หลังปรับปรุง	15	502	142	37
ก่อนปรับปรุง	15	4437	580	150

Estimation for Difference

Difference	95% Upper Bound for Difference
-3935	-3665

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$

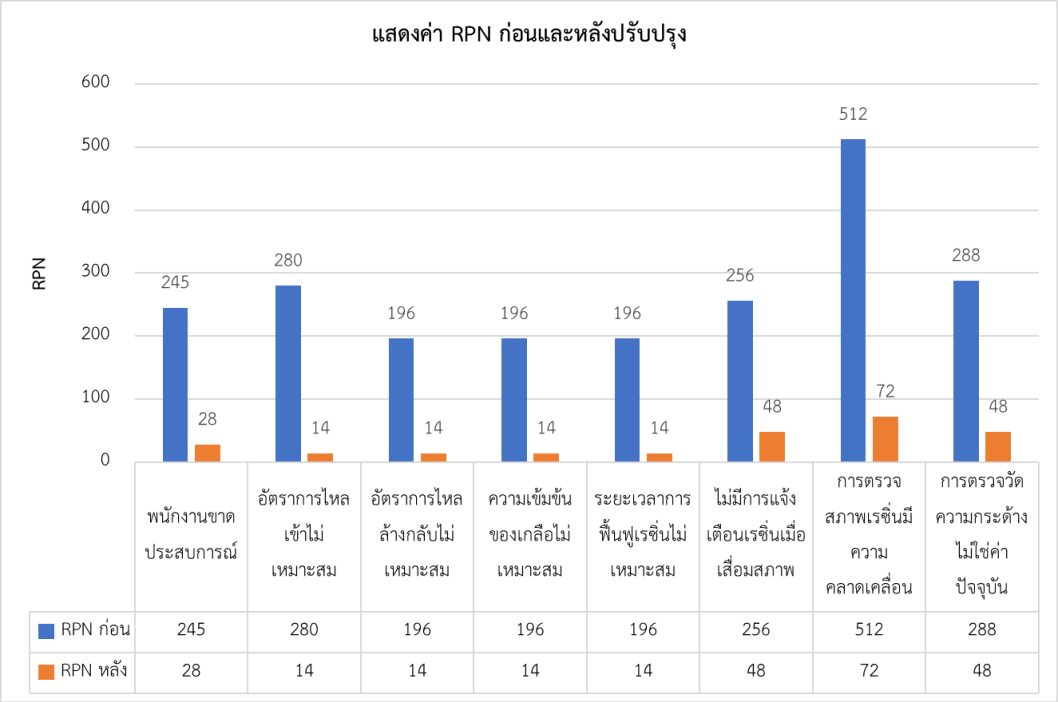
T-Value	DF	P-Value
-25.53	15	0.000

รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

จากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ฉะนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอ่อนเกินมาตรฐานหลังการปรับปรุงกระบวนการ มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.4 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงชี้นำ (RPN) **ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ**

หลังจากการระบุปัญหาความกระด้างของน้ำ โดยวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบต่อคุณภาพของการผลิต (Process FMEA) และได้ดำเนินการแก้ไขสาเหตุที่มีค่าดัชนีชี้นำมากกว่า 100 แล้วนั้น ผู้วิจัยได้ให้กลุ่มผู้เชี่ยวชาญทำการประเมินค่า RPN อีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดความเสียหายว่ามีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงเพียงใด แสดงดังตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงค่า RPN ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าความเสี่ยงชี้นำก่อนปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

สาเหตุ	Sev	Occ	Det	RPN	การปรับปรุงกระบวนการ	Sev	Occ	Det	RPN
พนักงานขาดประสบการณ์	7	7	5	245	ลดการใช้คนในการทำงาน เปลี่ยนเป็นระบบอัตโนมัติ	7	2	2	28
อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม	7	10	4	280	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม	7	2	1	14
อัตราการไหลล้างกลับไม่เหมาะสม	7	7	4	196	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม	7	2	1	14
ความเข้มข้นของเกลือไม่เหมาะสม	7	7	4	196	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม	7	2	1	14
ระยะเวลาการฟื้นฟูเรซิ่นไม่เหมาะสม	7	7	4	196	ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม	7	2	1	14
ไม่มีการแจ้งเตือนเรซิ่นเมื่อเสื่อมสภาพ	8	8	4	256	ทำ Webserver โดยนำข้อมูล Hardness analyzer มาแสดงผ่าน Web browser และทำเครือข่ายขึ้นใหม่โดยใช้ Router ของโรงงานเป็น Access point ในการเชื่อมต่อผ่านมือถือได้ทั่วโรงงาน	8	2	3	48
การตรวจสภาพเรซิ่นมีความคลาดเคลื่อน	8	8	8	512	เปลี่ยนการทดสอบเรซิ่นจากการหยดน้ำยา มาใช้เครื่องมือวัดและวิเคราะห์ความกระด้าง (Hardness analyzer) เพื่อบันทึกค่าไปยัง SCADA	8	3	3	72
การตรวจวัดความกระด้างไม่ใช่ค่าปัจจุบัน	8	9	4	288	นำค่า Hardness analyzer มาแสดงที่หน้าจอ HMI และหน้าจอมือถือ	8	3	2	48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปรายละเอียดของการปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำอ่อน และการกล่าวถึงผลการดำเนินงานปรับปรุงกระบวนการ เปรียบเทียบก่อนปรับปรุงและหลังการปรับปรุง โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำอ่อนของโรงงานตัวอย่าง มุ่งไปที่การเพิ่มปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบและลดปริมาณน้ำกระด้างที่เกินมาตรฐาน โดยก่อนการทดลองปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบมีค่า 1,681 ลบ.ม. ค่าความสามารถพื้นฐานในการกำจัดความกระด้างของเรซิ่น (Basic capacity) มีค่า 55.3 g/l และปริมาณน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐานมีค่า 4,437 ลิตรโดยเฉลี่ย ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุโดยใช้แผนผังก้างปลา (Fish bone) พบว่ามีทั้งหมด 20 สาเหตุ ซึ่งการปรับปรุงทั้ง 20 สาเหตุอาจใช้งบประมาณที่สูง ผู้วิจัยจึงได้ทำการคัดกรองสาเหตุที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความกระด้างของน้ำมากที่สุด โดยใช้เครื่องมือการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis; FMEA) สามารถกรองปัจจัยที่สำคัญเหลือเพียง 8 ปัจจัย

หลังจากได้ปัจจัยที่จะนำมาทำการปรับปรุง ผู้วิจัยได้เริ่มทำการออกแบบระบบผลิตน้ำอ่อนเดิม จากการที่ใช้พนักงานปฏิบัติงานกับเครื่องจักรทุกขั้นตอน ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดมาก เนื่องจากต้องใช้ประสบการณ์ส่วนตัว ปรับปรุงให้เป็นระบบอัตโนมัติสามารถแก้ปัญหา พนักงานขาดประสบการณ์ และพนักงานจดค่าผิดได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้จัดทำคู่มือการปฏิบัติงานขึ้นมาใหม่เพื่อลดความผิดพลาดในการปฏิบัติงาน ส่วนอีก 4 ปัจจัย เป็นปัจจัยนำเข้าที่สำคัญต่อความกระด้างของน้ำโดยตรง คือ อัตราการไหลเข้าไม่เหมาะสม ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินไม่เหมาะสม ความเข้มข้นน้ำเกลือไม่เหมาะสม และอัตราการไหลล้างกลับไม่เหมาะสม ผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองเข้ามาแก้ 4 ปัญหานี้ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-behnken โดยรายละเอียดแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 30

ตารางที่ 6.1 แสดงปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ลำดับที่	ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	-1	0	1
1	อัตราการไหลเข้า	A	ลบ.ม./ชั่วโมง	30	40	50
2	ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิน	B	นาที	5	10	15
3	อัตราการไหลในการล้างกลับ	C	ลบ.ม./ชั่วโมง	5	10	15
4	ความเข้มข้นน้ำเกลือ	D	%	5	10	15

จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความกระด้างของน้ำทั้งหมด ผลของอันตรกิริยาคือระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซิ่นกับความเข้มข้นของเกลือ จากนั้นทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อจะนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการ พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดดังนี้ อัตราการไหลเข้าที่เหมาะสม 42 ลบ.ม./ชม. , ระยะเวลาในการฟื้นฟูเรซินที่เหมาะสม 15 นาที อัตราการไหลล้างกลับที่เหมาะสมคือ 15 ลบ.ม./ชม. และความเข้มข้นน้ำเกลือที่เหมาะสม คือ 15 %

หลังจากการปรับปรุงระบบผลิตน้ำอ่อนพบว่าปริมาณน้ำอ่อนที่เกินมาตรฐานลดลงจาก 4,437 ลิตร เป็น 502 ลิตร คิดเป็น 88.69 % ปริมาณน้ำอ่อนต่อรอบเรซิ่นเพิ่มขึ้นจาก 1,681 ลูกบาศก์เมตร เป็น 1,992 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็น 18.5 % ความสามารถพื้นฐานในการกำจัดความกระด้างของเรซิ่นเพิ่มขึ้นจากเดิม 49.98 กรัมต่อลิตร เป็น 59.22 กรัมต่อลิตร ค่าความเสี่ยงชี้นำลดลง 88.38% และสามารถลดจำนวนพนักงานหน้างาน รวมทั้งลดความผิดพลาดจากพนักงานได้

6.2 อุปสรรคในงานวิจัย

1. เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับระบบผลิตน้ำอ่อนจริง ทำให้จะต้องมีการกักตุนน้ำไว้ใช้ในโรงงานส่วนหนึ่ง เนื่องจากกันผลกระทบถ้าการทดลองผิดพลาด ทำให้ค่าความกระด้างเกินมาตรฐาน จำเป็นต้องระบายน้ำทิ้งทั้งหมด

2. การปรับปรุงระบบผลิตน้ำจากเดิมใช้พนักงานในการควบคุมทุกกระบวนการ จะเปลี่ยนเป็นใช้ระบบอัตโนมัติ ทำให้พนักงานไม่มีความเคยชิน และเทคโนโลยีที่ใช้มีความทันสมัย ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการเรียนรู้

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงเฉพาะระบบผลิตน้ำอ่อน ซึ่งในโรงงานยังมีระบบผลิตน้ำดีมีน (Demineral Water) และน้ำอาร์โอ (Reverse Osmosis) ซึ่งสามารถปรับปรุงต่อไปได้

2. พารามิเตอร์ที่ปรับสามารถใช้กับระบบน้ำอ่อนของโรงงานตัวอย่างนี้เท่านั้น ในกรณีที่ใช้กับโรงงานอื่นที่มีความสามารถในการผลิต ขนาดถัง หรืออัตราการไหลเท่ากับงานวิจัยนี้ ก็อาจเกิดผลคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากคุณภาพของน้ำดิบแต่ละพื้นที่ ไม่เท่ากัน

3. งานวิจัยนี้ได้ทำระบบเก็บข้อมูล (Database) ไว้ ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดกับระบบอื่นหรือวางแผนและทำนายการใช้น้ำในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

T.P.Sivanandan (2020). "How to Calculate Resin Capacity for Softener." water-chemistry.

โลวะกิจ, ป. (2550). การศึกษา วิเคราะห์และควบคุมปริมาณโลหะมีค่าในกระบวนการผลิตเครื่องประดับโดยใช้เทคนิค FMEA, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

ไพศาล วีรกิจ (2555). การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม, เอ็มแอนด์อี.

ตัณฑุลเวศม์, ม. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม 2, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธิดารัตน์ ธัญญรักษ์ (2558). การลดเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

บุญเกตุ, อ. (2549). กระบวนการผลิตและของเสียที่เกิดขึ้นในแผนกตกแต่งและเผาผลิตภัณฑ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

ประคอง คำนวณดี (2560). การลดของเสียในการพิมพ์ธนบัตร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ (2556). ระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม. มีน เซอร์วิส ซัพพลาย.

พรศักดิ์ ทวีมหาเกียรติ (2539). การลดและควบคุมต้นทุนบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

ภูมิชูพงษ์ พูลสุวรรณ (2555). การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์(พีเอซี)กับค่าความขุ่น, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

มัณยานนท์, ส. (2550). การประยุกต์แนวทาง FMEA เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนมาตรวัดแรงดัน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

รณชัย ไม้สนธิ์ (2553). การลดของเสียจากการอบยางในกระบวนการผลิตยางรถยนต์โดยใช้เทคนิค FMEA, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

วังไพศาล, ท. (2554). วิศวกรรมการประปา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิวพร กระแสผล (2560). การปรับปรุงกระบวนการควบคุมคุณภาพ ของการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นด้วยหลักการวิเคราะห์รูปแบบของความเสียหายและผลกระทบ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

สมนึก จารุดิลกกุล (2538). การบำบัดน้ำที่ออกจากกระบวนการสลัดจ์กัมมันต์ เพื่อใช้เป็นน้ำเติม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หอทำน้ำเย็น, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

อยุธยา, ร. ด. ป. ส. ณ. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง, สำนักพิมพ์ท้อป.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก คู่มือการปฏิบัติงาน

Doc No.:		Effective on:	March, 2019
Account:			
Project:	Modified Water Softener System		

บทที่ 3 คู่มือการปฏิบัติงาน

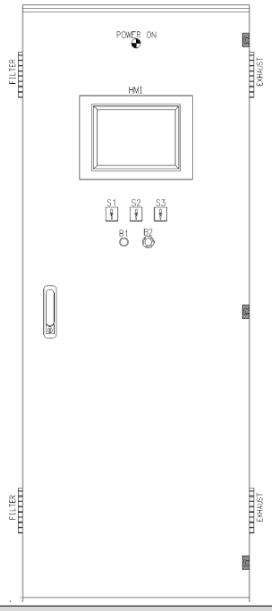
(Operating Manual)

การเปิดปิดระบบและปฏิบัติงานอย่างถูกวิธี มีการดูแลรักษาและทำความสะอาดระบบอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้ระบบมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานควรปฏิบัติงานตามคู่มือและคำแนะนำอย่างเคร่งครัด และทำการจดบันทึกข้อมูลการทำงานของระบบ (Data Log Sheet) เป็นประจำ เพื่อประโยชน์ในการป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้น และเพื่อสืบหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น

1. ขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Operating Instruction)

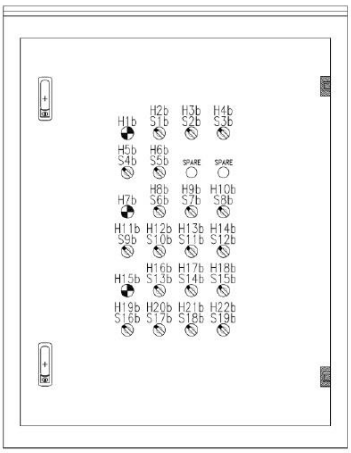
1.1 รายละเอียดหน้าตู้ควบคุมที่ต้องใช้ในขั้นตอนการปฏิบัติงาน

1.1.1 SOFTENER No. 7,8



Symbol	Description
-	LAMP - POWER ON
HMI	HMI
S1	SWITCH – ACF SYSTEM : OFF/AUTO
S2	SWITCH – SOFTENER#7 SYSTEM : OFF/AUTO
S3	SWITCH – SOFTENER#8 SYSTEM : OFF/AUTO
B1	SWITCH – ACKNOWLEDGE ALARM
B2	SWITCH – EMERGENCY STOP

1.1.2 LOCAL SOFTENER No. 7,8

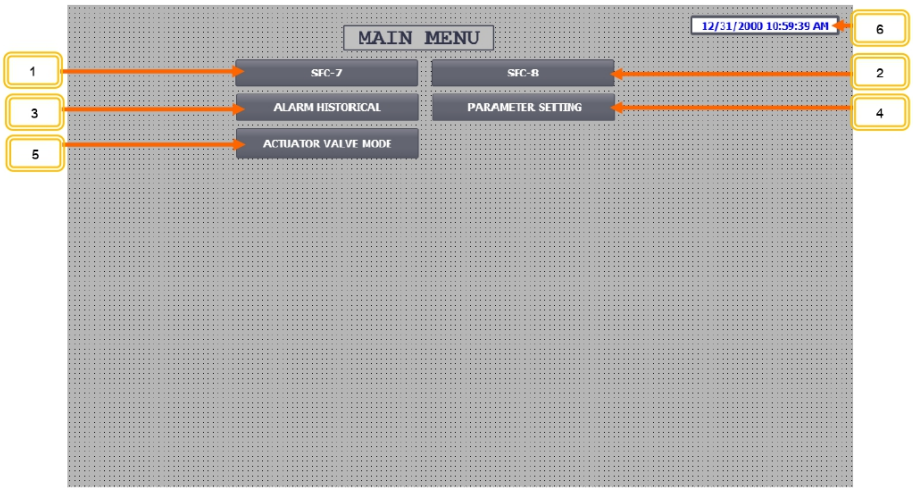


Symbol	Description
H1b	LAMP – ACF SYSTEM : FILTRATE
S1b/H2b	SWITCH – ACF FEED VALVE (AV2101) : MANUAL / AUTO
S2b/H3b	SWITCH – ACF BACKWASH OUTLET VALVE (AV2102) : MANUAL / AUTO
S3b/H4b	SWITCH – ACF BACKWASH INLET VALVE (AV2103) : MANUAL / AUTO
S4b/H5b	SWITCH – ACF RINSE VALVE (AV2104) : MANUAL / AUTO
S5b/H6b	SWITCH – ACF SERVICE VALVE (AV2105) : MANUAL / AUTO
H7b	LAMP – SOFTENER#7 SYSTEM : FILTRATE
S6b/H8b	SWITCH – SOFTENER#7 FEED VALVE (AV2201) : MANUAL / AUTO
S7b/H9b	SWITCH – SOFTENER#7 BACKWASH OUTLET VALVE (AV2202) : MANUAL / AUTO
S8b/H10b	SWITCH – SOFTENER#7 BACKWASH INLET VALVE (AV2203) : MANUAL / AUTO
S9b/H11b	SWITCH – SOFTENER#7 RINSE VALVE (AV2204) : MANUAL / AUTO
S10b/H12b	SWITCH – SOFTENER#7 SERVICE VALVE (AV2205) : MANUAL / AUTO
S11b/H13b	SWITCH – SOFTENER#7 FAST RINSE VALVE (AV2206) : MANUAL / AUTO
S12b/H14b	SWITCH – SOFTENER#7 BRINE IN VALVE (AV2207) : MANUAL / AUTO
H15b	LAMP – SOFTENER#8 SYSTEM : FILTRATE
S13b/H16b	SWITCH – SOFTENER#8 FEED VALVE (AV2301) : MANUAL / AUTO
S14b/H17b	SWITCH – SOFTENER#8 BACKWASH OUTLET VALVE (AV2302) : MANUAL / AUTO
S15b/H18b	SWITCH – SOFTENER#8 BACKWASH INLET VALVE (AV2303) : MANUAL / AUTO
S16b/H19b	SWITCH – SOFTENER#8 RINSE VALVE (AV2304) : MANUAL / AUTO
S17b/H20b	SWITCH – SOFTENER#8 SERVICE VALVE (AV2305) : MANUAL / AUTO
S18b/H21b	SWITCH – SOFTENER#8 FAST RINSE VALVE (AV2306) : MANUAL / AUTO
S19b/H22b	SWITCH – SOFTENER#8 BRINE IN VALVE (AV2307) : MANUAL / AUTO

1.2 รายละเอียดหน้าจอแสดงผล (Touch Screen Display)

หน้าจอการทำงานของระบบ มีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 หน้าจอรายการหลัก (Main Menu)



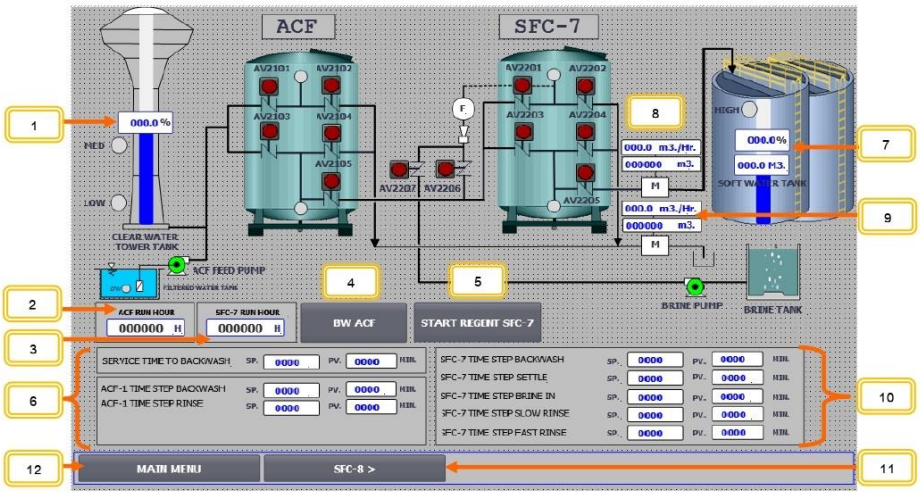
1. = เข้าสู่หน้าจอของระบบ Softener#7 (SFC-7)
2. = เข้าสู่หน้าจอของระบบ Softener#8 (SFC-8)
3. = เข้าสู่หน้าจอของข้อความแจ้งเตือนของระบบ (Alarm Historical)
4. = เข้าสู่หน้าจอของการตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameter Setting)
5. = เข้าสู่หน้าจอของการตั้งค่าการทำงานของ Actuator Valve (Actuator Valve Mode)
6. = แสดงวันและเวลา

Doc No.: Effective on: March, 2019

Account:

Project: Modified Water Softener System

1.2.2 หน้าจอระบบ ACF และ Softener#7



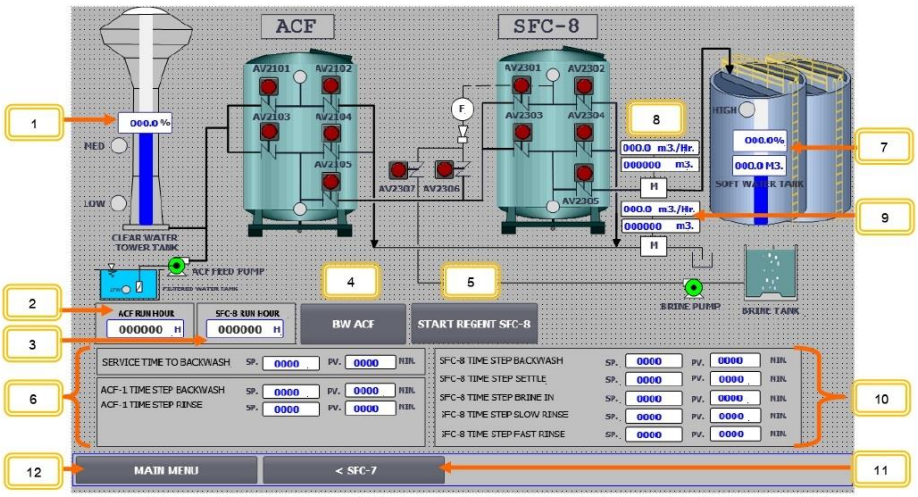
1. = แสดงระดับน้ำในถัง Clear water tower tank
2. = แสดงชั่วโมงการทำงานของระบบ ACF
3. = แสดงชั่วโมงการทำงานของระบบ Softener#7
4. = ปุ่มกดเพื่อเริ่มการล้างกลับ (Backwash)
5. = ปุ่มกดเพื่อเริ่มการฟื้นฟูสภาพสารกรอง (Regeneration) ระบบ Softener#7
6. = การตั้งค่าการทำงานของระบบ - SP, Set Point (ค่าที่ตั้งหรือกำหนดไว้)/ PV, Process Values (ค่าที่กำลังทำงาน)
   - ตั้งค่าเวลาเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการล้างกลับ (Service time to backwash)
   - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างกลับ (ACF time step backwash)
   - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างทิ้ง (ACF time step rinse)
7. = แสดงระดับน้ำในถัง Soft water tank (%) และปริมาตรน้ำในถัง (m^3)
8. = แสดงอัตราการไหลของน้ำซอฟท์ (m^3/hr) และปริมาตรของน้ำซอฟท์ (m^3)
9. = แสดงอัตราการไหลของน้ำทิ้ง (m^3/hr) และปริมาตรของน้ำทิ้ง (m^3)
10. = การตั้งค่าการทำงานของระบบ - SV, Set Values (ค่าที่ตั้งหรือกำหนดไว้)/ PV, Process Values (ค่าที่กำลังทำงาน)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างกลับ (SFC-7 time step backwash)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการเรียงตัวของสารกรอง (SFC-7 time step settle)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างน้ำเกลือ (SFC-7 time step brine in)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างทิ้งแบบช้า (SFC-7 Time step slow rinse)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างทิ้งแบบเร็ว (SFC-7 Time step fast rinse)
11. = เข้าสู่หน้าจอของระบบ ACF และ Softener#8
12. = กลับสู่หน้าจอรายการหลัก

Doc No.: Effective on: March, 2019

Account:

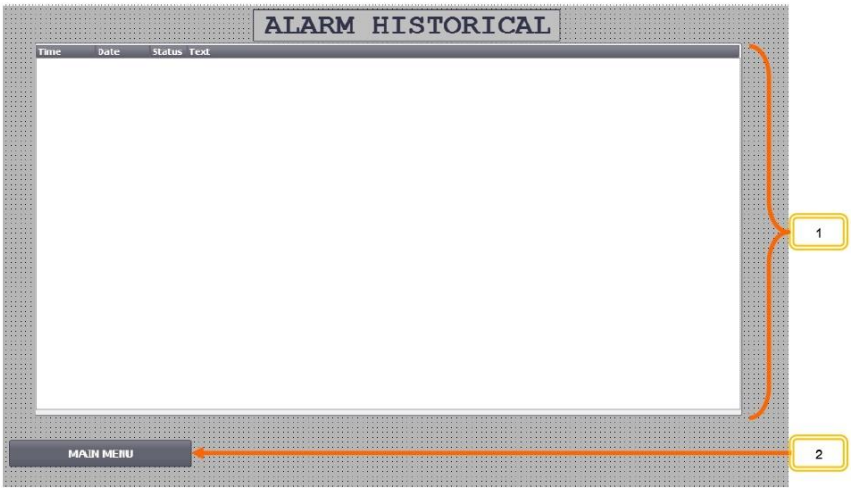
Project: Modified Water Softener System

1.2.3 หน้าจอระบบ ACF และ Softener#8



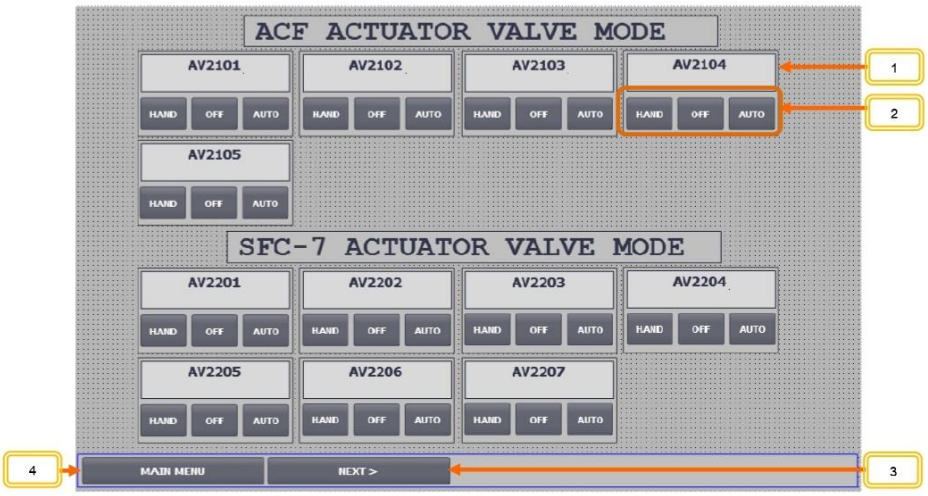
1. = แสดงระดับน้ำในถัง Clear water tower tank
2. = แสดงชั่วโมงการทำงานของระบบ ACF
3. = แสดงชั่วโมงการทำงานของระบบ Softener#8
4. = ปุ่มกดเพื่อเริ่มการล้างกลับ (Backwash)
5. = ปุ่มกดเพื่อเริ่มการฟื้นฟูสภาพสารกรอง (Regeneration) ระบบ Softener#8
6. = การตั้งค่าการทำงานของระบบ - SP, Set Point (ค่าที่ตั้งหรือกำหนดไว้)/ PV, Process Values (ค่าที่กำลังทำงาน)
   - ตั้งค่าเวลาเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการล้างกลับ (Service time to backwash)
   - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างกลับ (ACF time step backwash)
   - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างทิ้ง (ACF time step rinse)
7. = แสดงระดับน้ำในถัง Soft water tank และปริมาตรน้ำในถัง (m^3)
8. = แสดงอัตราการไหลของน้ำซอฟท์ (m^3/hr) และปริมาตรของน้ำซอฟท์ (m^3)
9. = แสดงอัตราการไหลของน้ำทิ้ง (m^3/hr) และปริมาตรของน้ำทิ้ง (m^3)
10. = การตั้งค่าการทำงานของระบบ - SV, Set Values (ค่าที่ตั้งหรือกำหนดไว้)/ PV, Process Values (ค่าที่กำลังทำงาน)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างกลับ (SFC-8 time step backwash)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการเรียงตัวของสารกรอง (SFC-8 time step settle)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างน้ำเกลือ (SFC-8 time step brine in)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างทิ้งแบบช้า (SFC-8 Time step slow rinse)
    - ตั้งค่าเวลาสำหรับการล้างทิ้งแบบเร็ว (SFC-8 Time step fast rinse)
11. = เข้าสู่หน้าจอของระบบ ACF และ Softener#7
12. = กลับสู่หน้าจอรายการหลัก

1.2.4 หน้าจอข้อความแจ้งเตือนของระบบ (Alarm Historical)



1. = แสดงรายการข้อความแจ้งเตือนของระบบ
2. = กลับสู่หน้าจอรายการหลัก

1.2.5 หน้าจอของการตั้งค่าการทำงานของ Actuator Valve ระบบ ACF และ Softener#7



1. = ชื่อของวาล์ว
2. = สวิตช์ของวาล์วสามารถปรับได้ 3 ตำแหน่ง ดังนี้
   - Hand = เลือกให้วาล์วทำงานทันที
   - Off = ปิดการทำงานของวาล์ว
   - Auto = เลือกให้วาล์วทำงานโดยอัตโนมัติ
3. = เข้าสู่หน้าจอของการตั้งค่าการทำงานของ Actuator Valve ระบบ Softener#8
4. = กลับสู่หน้าจอรายการหลัก

ภาคผนวก ข การคำนวณ Basic capacity resin (T.P.Sivanandan 2020)

ก่อนการปรับปรุง

- น้ำดิบมีความกระด้างขาเข้า 110 mg/l as $CaCO_3$
- ปริมาณเรซินในถัง 3,700 ลิตร
- น้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบมีค่า *1,681* ลูกบาศก์เมตรโดยเฉลี่ย (จากตารางที่ 1.1)

$$\text{Basic capacity} = \frac{\text{ความกระด้าง}(\text{มก./ลิตร}) \mathbf{x} (\text{ปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้})(\text{ลบ.ม.})}{\text{ปริมาตรเรซิ่น}(\text{ลิตร})}$$

$$= \frac{\mathbf{110x(1{,}681)}}{\mathbf{3{,}700}}$$

$$= \mathbf{49.98\ g/l}$$

หลังการปรับปรุง

- น้ำดิบมีความกระด้างขาเข้า 110 mg/l as $CaCO_3$
- ปริมาณเรซินในถัง 3,700 ลิตร
- น้ำอ่อนที่ผลิตได้ต่อรอบมีค่า 1,992 ลูกบาศก์เมตรโดยเฉลี่ย (จากรูปที่ 5.1)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\text{Basic capacity} = \frac{\text{ความกระด้าง}(\text{มก./ลิตร}) \mathbf{x} (\text{ปริมาณน้ำอ่อนที่ผลิตได้})(\text{ลบ.ม.})}{\text{ปริมาตรเรซิ่น}(\text{ลิตร})}$$

$$= \frac{\mathbf{110x(1{,}992)}}{\mathbf{3{,}700}}$$

$$= \mathbf{59.22\ g/l}$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นาย อลงกรณ์ ศรกาญจนอัมพร

วุฒิการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University