การลดเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

นางสาวธิดารัตน์ ธัญญรักษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TIME REDUCTION FOR RESIN RECIRCULATE RINSE IN DEMINERALIZED WATER PRODUCTION

Miss Thidarat Thanyarak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ
โดย	นางสาวธิดารัตน์ ธัญญรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

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

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ธิดารัตน์ ธัญญรักษ์ : การลดเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (TIME REDUCTION FOR RESIN RECIRCULATE RINSE IN DEMINERALIZED WATER PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ปารเมศ ชุติมา, 116 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการนำแนวทางซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการลดระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ โดยยึดหลักในการควบคุมทางสถิติเป็นสำคัญ แนวทางซิกซ์ ซิกมามีขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ขั้นตอน ได้แก่ ระยะนิยามปัญหา ระยะตรวจวัดปัญหา ระยะวิเคราะห์ปัญหา ระยะปรับปรุงกระบวนการ และระยะควบคุมกระบวนการ

ในงานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนของซิกซ์ ซิกมา 5 ระยะ ดังนี้ 1) ระยะนิยามปัญหา ศึกษาปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา กำหนดปัญหาและขอบเขตในงานวิจัย 2) ระยะตรวจวัด เริ่มด้วยการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัด ซึ่งได้ผลการทดสอบผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับ จากนั้นระดมสมองวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลา นำปัจจัยที่ได้มาคัดกรองปัจจัยด้วยตารางแสดงเหตุและผลและการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ 3) ระยะวิเคราะห์ปัญหา ทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยด้วยการทำการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^{k-1} โดยใช้แบบจำลองในระดับปฏิบัติการเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริง 4) ระยะปรับปรุงกระบวนการ ในขั้นตอนนี้ทำการทดลองหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล พบว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมคือ เรซินประจุลบเรซินใหม่ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุบวกและเรซินประจุลบ 0.15 และ 0.10 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ 5) ระยะควบคุมกระบวนการ นำผลการทดลองในระดับปฏิบัติการมาทดลองจริงในกระบวนการผลิตระดับโรงงานเพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ผลหลังปรับปรุง และสร้างแนวทางในการควบคุมให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอยู่ในระดับต่ำต่อไป

ผลการปรับปรุงกระบวนการพบว่าระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินมีระยะเวลาลดลง 85% จาก 150 นาทีลดเหลือ 23 นาที สามารถเพิ่มการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้เพิ่มขึ้น 10,780 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

5770928021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS: DEMINERALIZED WATER / RECIRCULATION RINSE / SIX SIGMA

THIDARAT THANYARAK: TIME REDUCTION FOR RESIN RECIRCULATE RINSE IN DEMINERALIZED WATER PRODUCTION. ADVISOR: PROF. DR.PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 116 pp.

This research applied six sigma approach to reduce the duration of resin recirculate rinse in demineralized water production. The method is significantly base on statistical quality control concept. The six sigma approach has five steps in working process, which are Define phase, Measure phase, Analyze phase, Improvement phase and Control phase, respectively.

This research followed the five steps according to five terms as follows: 1) Define phase, study the current problem of a case study factory. Define problem and scope of the research. 2) Measure phase, started with the inspection of measurement system which had the result that met the acceptance criteria. Next brainstorm, analyze the causes of problems with cause and effect diagram then, screened the factors with cause and effect matrix and used FMEA technique. 3) Analyze phase, testing the significance of the factors with the 2^{k-1} factorial design by using the model in laboratory to find root causes. 4) Improvement phase, used factorial experiment design to get optimal value of each factors. The suggested values are new anion resin, flow rate of slow rinse at cation and anion exchanger 0.15 and 0.10 litres per minute respectively. 5) Control phase, Implement the results in mill trial to confirm the results and analysis of results after improvement. And established guidelines to control and minimize resin recirculate rinse time.

After improvement the process, the results of the study showed the duration of resin recirculate rinse decrease 85% from 150 minutes to 23 minutes the production of demineralized water has increased 10,780 cubic meters.

Department: Industrial Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและติดตามระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ตลอดจนแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นด้วยความเอาใจใส่เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจข้อบกพร่องให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้จัดการโรงงานกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนพนักงานที่ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูลและทำการทดลองเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ คณะทำงานทุกท่านที่ช่วยกันระดมสมอง ให้คำแนะนำ ความรู้ และความช่วยเหลือที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ ให้ความช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ข้อมูลทั่วไปและขั้นตอนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา 1
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหางานวิจัย 5
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย 10
1.4 ขอบเขตงานวิจัย 10
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 10
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 10
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 13
2.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) 13
2.2 การปรับปรุงคุณภาพตามแนวคิดซิกซ์ ซิกมา 17
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ 28
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
บทที่ 3 ระยะนิยามปัญหา (Define Phase) 37
3.1 บทนำ 37
3.2 ศึกษากระบวนการผลิต 37
3.3 การกำหนดปัญหา 40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.4 การกำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัด 43
3.5 การจัดตั้งคณะทำงาน 43
3.6 สรุประยะนิยามปัญหา 44
บทที่ 4 ระยะตรวจวัดปัญหา (Measure Phase) 45
4.1 บทนำ 45
4.2 การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัด 45
4.3 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า 53
4.3.1 การหาปัจจัยโดยใช้แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) 53
4.3.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) 56
4.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) 62
4.4 สรุประยะตรวจวัดปัญหา 67
บทที่ 5 ระยะวิเคราะห์สาเหตุปัญหา (Analysis Phase) 69
5.1 บทนำ 69
5.2 ปัจจัยนำเข้าที่นำมาทดสอบสมมติฐาน 69
5.3 ตัวแปรตอบสนอง 71
5.4 การออกแบบการทดลอง 71
5.5 ขั้นตอนการทดลอง 71
5.6 ผลการทดลอง 72
5.7 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 74
5.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 77
5.9 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา 78
บทที่ 6 ระยะปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve Phase) 80
6.1 บทนำ 80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

6.2 ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ 80
6.3 ตัวแปรตอบสนอง 81
6.4 การออกแบบการทดลอง 81
6.5 ขั้นตอนการทดลอง 81
6.6 ผลการทดลอง 82
6.7 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 83
6.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 86
6.9 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ 90
บทที่ 7 ระยะควบคุมกระบวนการ (Control Phase) 91
7.1 บทนำ 91
7.2 ข้อมูลหลังปรับปรุงกระบวนการผลิต 91
7.3 แนวทางการควบคุมระดับของปัจจัย 93
7.3.1 เรซินประจุลบ 93
7.3.2 อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation 93
7.3.3 อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion 93
7.4 สรุประยะการควบคุมกระบวนการผลิต 94
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 95
8.1 บทนำ 95
8.2 บทสรุประยะนิยามปัญหา 95
8.3 บทสรุประยะตรวจวัดปัญหา 95
8.4 บทสรุประยะวิเคราะห์ปัญหา 96
8.5 บทสรุประยะปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ 96
8.6 บทสรุประยะควบคุมกระบวนการผลิต 97

หน้า

8.7 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย 97
8.8 ข้อเสนอแนะ 98
รายการอ้างอิง 99
ภาคผนวก 102
ภาคผนวก ก ข้อมูลระยะนิยามปัญหา 103
ภาคผนวก ข ค่าการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา 106
ภาคผนวก ค การควบคุมการผลิต 111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 116

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เกณฑ์คุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุ 5
ตารางที่ 1.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ 9
ตารางที่ 2.1 ผลจากการตัดสินใจจากการทดสอบสมมุติฐาน..... 25
ตารางที่ 2.2 ชนิดของไอออนบวกและไอออนลบต่างๆ ในน้ำ 28
ตารางที่ 3.1 เกณฑ์กำหนดคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ออกจากถัง Anion..... 40
ตารางที่ 3.2 เกณฑ์คุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ออกจากถัง Mix bed 40
ตารางที่ 3.3 บุคลากรในทีมวิจัยที่มาจากส่วนงานต่างๆ..... 43
ตารางที่ 4.1 ขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อประเมินระบบการวัด 47
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ในน้ำ..... 48
ตารางที่ 4.3 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการยอมรับระบบการวัด..... 52
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัย 57
ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์ลำดับปัจจัย 9 ปัจจัยแรกที่ส่งผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ... 59
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)..... 63
ตารางที่ 4.7 เรียงลำดับปัจจัยตามค่า RPN ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ FMEA..... 66
ตารางที่ 4.8 ปัจจัยที่คัดเลือกจากการวิเคราะห์ FMEA เพื่อทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป 67
ตารางที่ 5.1 ชนิดและปริมาณเรซินของแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ 70
ตารางที่ 5.2 ปัจจัยและระดับในการการทดลอง 2^{5-1} Factorial design..... 70
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน..... 72
ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองค่าคุณภาพน้ำ Anion 73
ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองค่าคุณภาพน้ำ Mixbed 74
ตารางที่ 6.1 ปัจจัยและระดับในการการทดลองแฟคทอเรียล..... 80
ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล 82

หน้า

ตารางที่ 6.3 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม..... 90

ตารางที่ 7.1 ผลเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ 92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ 3
รูปที่ 1.2 ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ..... 5
รูปที่ 1.3 ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ..... 6
รูปที่ 1.4 สัดส่วนการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุต่อปริมาณการใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุทั้งหมด..... 7
รูปที่ 1.5 แผนภาพสาเหตุและผลของปัญหา..... 8
รูปที่ 2.1 จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละ Sigma Quality Level..... 15
รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการกระจายตัวปกติภายใต้ Six Sigma Quality Level..... 16
รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการระดับสูง 17
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แผนผังกระบวนการ SIPOC สำหรับการวิเคราะห์..... 18
รูปที่ 2.5 แนวคิดของความสามารถกระบวนการ 20
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแผนผังแสดงเหตุและผล 21
รูปที่ 2.7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดลอง..... 24
รูปที่ 2.8 ทิศทางการไหลของน้ำในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน 32
รูปที่ 2.9 ทิศทางการไหลของสารเคมีในการฟื้นฟูสภาพเรซิน 34
รูปที่ 3.1 ผังกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ 37
รูปที่ 3.2 ถังแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (Cation Exchanger)..... 37
รูปที่ 3.3 ถังแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ (Anion Exchanger)..... 38
รูปที่ 3.4 ถังแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกและลบ (Mixed bed Exchanger) 38
รูปที่ 3.5 ถังเก็บน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water Tank)..... 39
รูปที่ 3.6 ระบบการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ต่อเนื่องกัน..... 39
รูปที่ 3.7 ระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ 41
รูปที่ 3.8 ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ..... 41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

รูปที่ 3.9 สัดส่วนการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุต่อปริมาณการใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุทั้งหมด 42
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบระบบการวัดของค่าซิลิกาไดออกไซด์ 51
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบระบบการวัดของค่าซิลิกาไดออกไซด์ (2) 51
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบระบบการวัดของค่าซิลิกาไดออกไซด์ (3) 52
รูปที่ 4.4 แผนภูมิก้างปลาแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน 55
รูปที่ 4.5 แผนภูมิพาเรโตเรียงตามคะแนนความสัมพันธ์ (Cause and Effect Matrix) 59
รูปที่ 4.6 แผนภาพพาเรโตเรียงตามลำดับปัจจัยตามค่า RPN 66
รูปที่ 5.1 แบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุในระดับปฏิบัติการ 70
รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ 75
รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ 76
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบสมมติฐานมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล 77
รูปที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน 78
รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ 84
รูปที่ 6.2 ผลการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ 85
รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบสมมติฐานมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล 86
รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน 87
รูปที่ 6.5 ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน 88
รูปที่ 6.6 ผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน 89
รูปที่ 7.1 พารามิเตอร์ที่ปรับค่าหน้าจอ DCS 92
รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินก่อนและหลังปรับปรุง 92

บทที่ 1
บทนำ

น้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water) เป็นน้ำที่ผ่านการกรองไอออน โดยใช้เรซินเป็นตัวกรองจึงทำให้น้ำที่ได้ไม่มีไอออนหลงเหลืออยู่ และเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงอย่างแท้จริงเพราะโมเลกุลที่เหลืออยู่ในน้ำปราศจากแร่ธาตุจะมีเพียงโมเลกุลของน้ำ (H_2O) เท่านั้น น้ำปราศจากแร่ธาตุสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายวงการ เช่น ทางยา เภสัชกรรม เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมเครื่องมืออิเล็กโทรนิกส์ กระบวนการผลิตอาหาร และในอุตสาหกรรมอีกจำนวนมาก

อุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำ ใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุในการแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากหากนำน้ำที่ไม่บริสุทธิ์ไปใช้โดยตรงในหม้อไอน้ำ หรือในหม้อน้ำร้อนจะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง และตะกรันก็จะก่อตัวขึ้นมาซึ่งจะทำให้ไปขัดขวางการถ่ายเทความร้อนและทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน น้ำปราศจากแร่ธาตุจึงมีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำ หากผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุไม่เพียงพอต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำ จะต้องซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุจากหน่วยงานภายนอกซึ่งส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำ การลดต้นทุนในกระบวนผลิตเป็นเรื่องที่บริษัทให้ความสนใจเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและทำกำไรได้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุโดยลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจะทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำปราศจากธาตุมากขึ้นและช่วยลดต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.1 ข้อมูลทั่วไปและขั้นตอนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตและขายส่งกระแสไฟฟ้า ไอน้ำ และน้ำปราศจากแร่ธาตุ โดยน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอน้ำ (Boiler) ต้องใช้น้ำที่ปราศจากแร่ธาตุ เนื่องจากหากใช้น้ำกระด้างเมื่อน้ำระเหยออกหมดจะพบธาตุแคลเซียม (Calcium, Ca) และแมกนีเซียม (Magnesium, Mg) เหลืออยู่เป็นตะกรันในระบบท่อจ่ายน้ำ หม้อไอน้ำ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นนี้ค่อนข้างเกาะติดแน่น ทำความสะอาดยาก จึงลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพิ่มขึ้น และหากเกิดตะกรันมากๆจะทำให้อัตราการไหลของน้ำในท่อลดลงหรือไม่สามารถไหลได้ ดังนั้นในกระบวนการผลิตไอน้ำจึงใช้น้ำที่ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized Water) แทนน้ำกระด้าง ทั้งนี้กระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุมีอัตราการผลิต 31 ลิตร/วินาที สามารถผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุจากน้ำประปาได้ 500 ลูกบาศก์เมตรต่อการฟื้นฟู

สภาพเรซิน 1 ครั้ง ระบบการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุของโรงงานกรณีศึกษาใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน (Ion Exchanger Resin) ในการกำจัดไอออนในน้ำกระด้าง

ธรรมชาติโดยทั่วไปของน้ำจะประกอบด้วยแร่ธาตุที่อยู่ในรูปไอออน ทั้งที่เป็นไอออนบวก (Cation) และไอออนลบ (Anion) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic matter) ต่างๆ ดังนั้นในระบบการแลกเปลี่ยนไอออนจึงประกอบด้วย Cation Exchanger และ Anion Exchanger โดยใช้เรซินเป็นตัวดูดซับไอออนที่มีประจุ ระบบการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุจะประกอบด้วยเรซินดังนี้

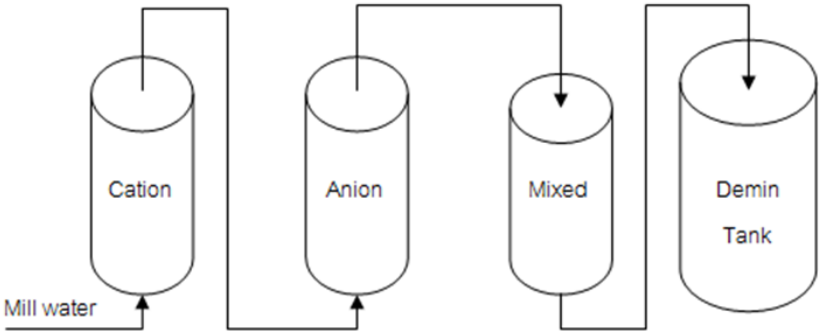
<u>ชนิดของเรซิน</u>

1. *เรซินประจุบวก (Cation Resin)* ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนบวกในตัวเองกับไอออนบวกในน้ำ เช่น Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} เรซินที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษาคือ Strong Acid Cation (Na form) Resin ชนิด Amberjet 1200Na อยู่ใน Cation Exchanger มีปริมาตรเรซิน 3.0 ลูกบาศก์เมตร และ Amberjet 1200H อยู่ใน Mixbed Exchanger มีปริมาตรเรซิน 0.65 ลูกบาศก์เมตร มีอายุการใช้งาน 5-7 ปี
2. *เรซินประจุลบ (Anion Resin)* ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนลบในตัวเองกับไอออนลบในน้ำ เช่น Cl^{-}, SiO_2, SO_4^{2-} เรซินที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษามี 2 ชนิดคือ

    2.1 Weak base anion (OH form) ชนิด Amberlite IRA 96 RF อยู่ใน Anion Exchanger มีปริมาตรเรซิน 1.6 ลูกบาศก์เมตร มีอายุการใช้งาน 4-6 ปี

    2.2 Strong base anion (Cl form) ชนิด Amberjet 4200 Cl อยู่ใน Anion Exchanger มีปริมาตรเรซิน 1.7 ลูกบาศก์เมตร และใน Mixbed Exchanger มีปริมาตรเรซิน 0.65 ลูกบาศก์เมตร มีอายุการใช้งาน 4-6 ปี

กระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ เริ่มจากรับน้ำประปาจากโรงกรองน้ำ เรียกว่า Mill water เข้าสู่ Cation Exchanger Tank ซึ่งเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินประจุบวก (Cation Resins) เพื่อกำจัดไอออนบวกในน้ำ จากนั้นน้ำจะเข้าสู่ Anion Exchanger Tank ซึ่งเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินประจุบลบ (Anion Resins) เพื่อกำจัดไอออนลบในน้ำและเข้าสู่ Mixed bed Exchanger Tank ซึ่งจะประกอบด้วยเรซินประจุบวกและเรซินประจุลบเพื่อกำจัดไอออนบวกและไอออนลบที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ จากนั้นจะได้น้ำที่ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized Water) เก็บไว้ใน Demin Tank ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (Lindfors 1997)



รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนมีการทำงาน 4 ขั้นตอนต่อเนื่องกันดังนี้

1. การแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online) เป็นกระบวนการทำให้ไอออนอิสระในเรซินถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นๆในน้ำ Mill จนกระทั่งไอออนอิสระในเรซินเหลือน้อย ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนต่างๆในน้ำ Mill ได้
2. การล้างย้อน (Backwash) หลังจากเรซินหมดประสิทธิภาพแล้ว ต้องทำการล้างย้อนเพื่อให้ชั้นเรซินมีการขยายตัวเกิดขึ้น เพื่อวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้
    1) ทำลายการจับตัวเป็นก้อนของเรซิน
    2) ล้างความขุ่นหรือตะกอนแขวนลอยที่ติดอยู่ในชั้นเรซิน
    3) ทำให้มีการเรียงชั้นใหม่ของเรซิน ซึ่งช่วยให้การกระจายน้ำของเรซินได้อย่างสม่ำเสมอในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน
3. การฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regeneration) เป็นการทำให้เรซินที่หมดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน (ชั่วคราว) กลับฟื้นประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยสารที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินเรียกว่า รีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) การฟื้นฟูสภาพเรซินประจุบวกใน Cation Exchanger และ Mixed Bed Exchanger คือ กรด H_2SO_4 เข้มข้น 98% และสารที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินประจุลบใน Anion Exchanger และ ใน Mixed Bed Exchanger คือด่าง NaOH เข้มข้น 50%
4. การชะล้าง (Rinse) เป็นการล้างเรซินเพื่อล้างสารรีเจนเนอแรนต์ที่อาจตกค้างอยู่ให้หลุดออกจากชั้นเรซิน มีอยู่ 3 ขั้นตอนคือ

1) Slow Rinse หรือ Displacement การชะล้างอย่างเร็ว โดยปล่อยให้น้ำประมาณ 1 เท่าของปริมาตรของชั้นเรซิน (Bed Volume) ไหลผ่านเรซินในอัตราเดียวกับการทำรีเจนเนอเรชัน น้ำล้างในขั้นตอนนี้เราถือว่าเป็นของเสีย เพราะมีสารละลายรีเจนเนอแรนต์ที่ใช้แล้วปนอยู่มาก
2) Fast Rinse การชะล้างอย่างรวดเร็วเพื่อขับไล่สารรีเจนเนอแรนต์ที่ยังตกค้างอยู่ให้หลุดออกจากชั้นเรซินให้หมด
3) Recirculation Rinse การชะล้างโดยการหมุนเวียนน้ำในระบบจนกว่าคุณภาพน้ำจะผ่านเกณฑ์คุณภาพที่ยอมรับได้จึงเริ่มระบบการแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online)

ในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ มีเกณฑ์ที่ใช้ควบคุมคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุ 4 ปัจจัยดังนี้

1. ความเป็นกรดด่างของน้ำ (pH) เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ใช้บอกความเป็นกรดหรือด่างของน้ำ
2. ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำตัวหนึ่ง โดยจะบ่งบอกถึงความสามารถของการนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากมีอยู่ของสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น ไอออนที่มีประจุบวกและประจุลบในน้ำ มีหน่วยเป็นไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (μS/cm)
3. ค่าความกระด้างของน้ำ (Total Hardness as $CaCO_3$) ความกระด้าง หมายถึงปริมาณรวมหรือความเข้มข้นรวมของแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำ โดยจะแสดงในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตรหรือส่วนในล้านส่วนในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต (part per million; ppm)
4. ค่าปริมาณซิลิกาในน้ำในรูปซิลิกาไดออกไซด์ (Silica as SiO_2) โดยจะแสดงในหน่วยของส่วนในพันล้านส่วน (part per billion; ppb)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

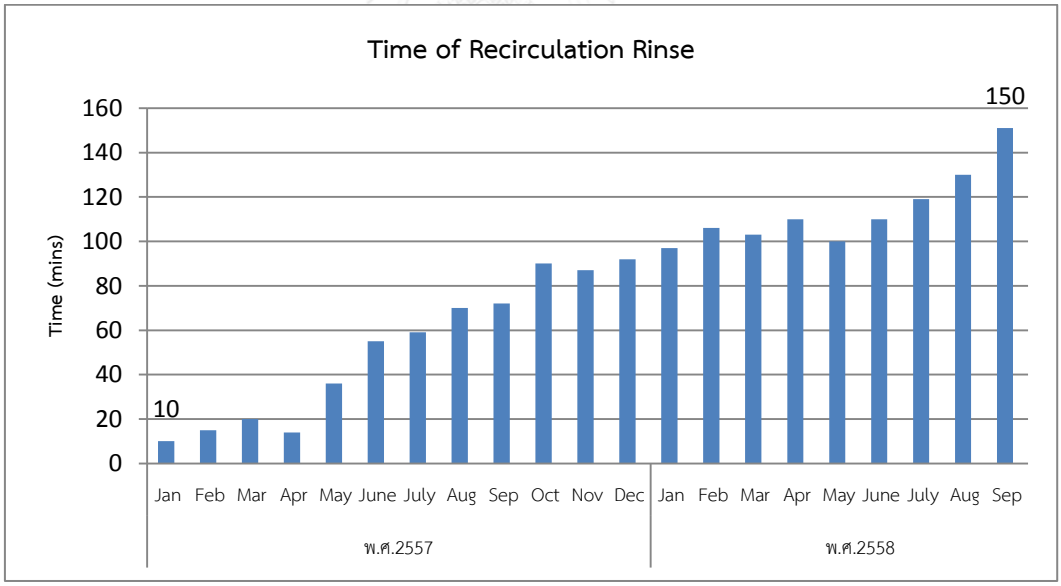
โรงงานกรณีศึกษามีเกณฑ์คุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่กำหนดไว้แสดงได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เกณฑ์คุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุ

Parameter	หน่วย	ค่าที่ยอมรับได้
pH	-	6.5 – 7.5
Conductivity	μS/cm	< 1.0
Total Hardness as $CaCO_3$	ppm	< 0.05
Silica (SiO_2)	ppb	< 20.0

1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหางานวิจัย

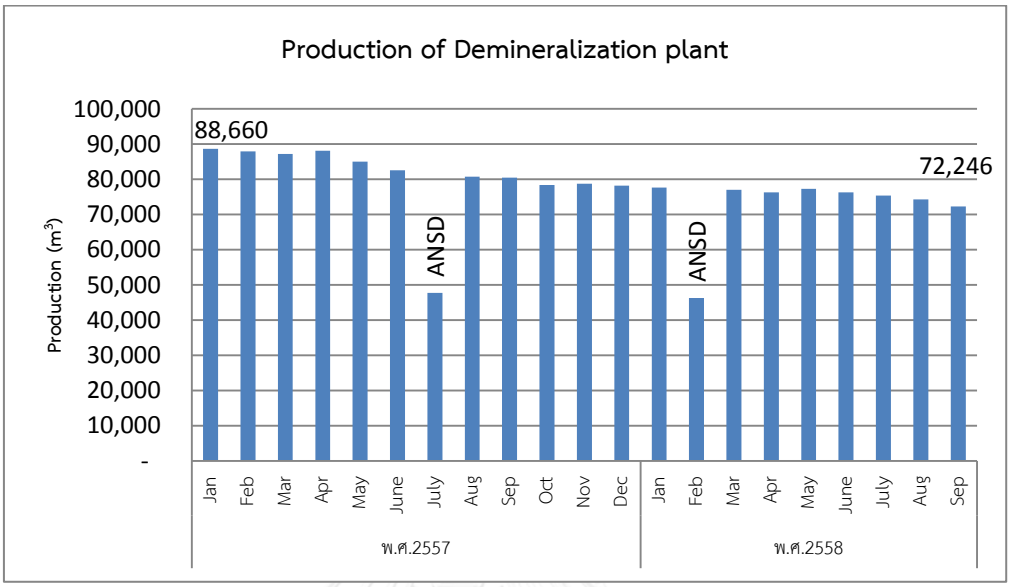
ปัจจุบันกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุพบปัญหาคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุหลังการฟื้นฟูสภาพเรซินมีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) สูงเกิน 1.0 μS/cm เมื่อคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุไม่ผ่านเกณฑ์ ต้องหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินจนกว่าน้ำปราศจากแร่ธาตุจะมีคุณภาพดีผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงจะเริ่มระบบการแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online) ทำให้ปัจจุบันใช้ระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (Recirculation Rinse) นานมากขึ้น ดังแสดงในกราฟรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

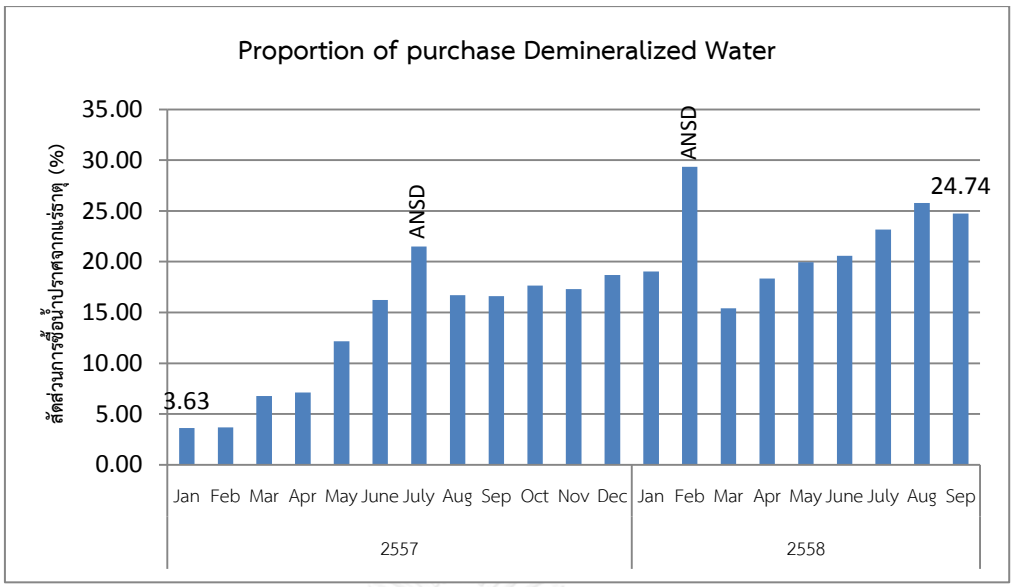
จากกราฟรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 และเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน จากเดิมใช้ระยะเวลา 10 นาที ปัจจุบันใช้ระยะเวลา 150 นาที ทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ ส่งผลให้ผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้น้อยลงดังแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งกำลังการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุสามารถผลิต

ได้ 31 ลิตรต่อวินาที สามารถผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ 500 ลูกบาศก์เมตรต่อการฟื้นฟูสภาพเรซิน 1 ครั้ง มีกำลังการผลิตสูงสุดที่ 3,500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือประมาณ 105,000 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน



รูปที่ 1.3 ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จากกราฟรูปที่ 1.3 จะเห็นได้ว่าข้อมูลปี 2557 ในเดือนมกราคมผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ 88,600 ลูกบาศก์เมตร และมีแนวโน้มผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ลดลงอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันในเดือนกันยายน 2558 ผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ 72,246 ลูกบาศก์เมตร จะเห็นได้ว่าผลิตน้ำได้ลดลงน้อยลงจากเดือนมกราคมปี 2014 ถึง 16,354 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็น 18.5% (ในเดือนกรกฎาคม 2557 และเดือนกุมภาพันธ์ 2558 มีการหยุดซ่อมบำรุงประจำปี (Annual Shut Down; ANSD) ทำให้มีผลผลิตน้อยกว่าเดือนอื่น) จากการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ลดน้อยลงทำให้เกิดปัญหาน้ำปราศจากแร่ธาตุไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ผลิตไอน้ำ โรงงานจึงซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุนี้จากภายนอก ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น ดังแสดงได้ในกราฟรูปที่ 1.4

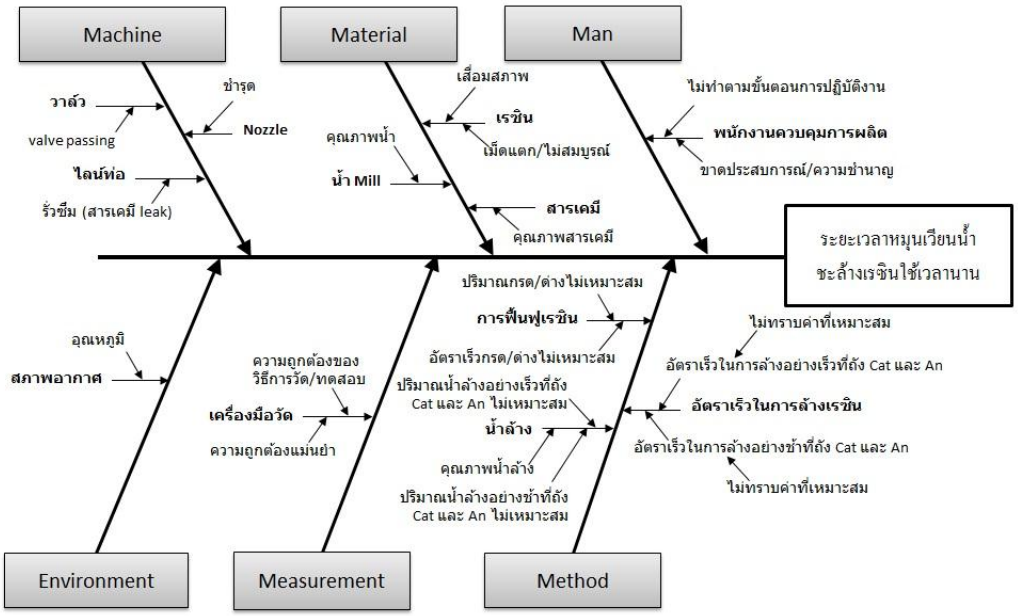


รูปที่ 1.4 สัดส่วนการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุต่อปริมาณการใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุทั้งหมด

เนื่องจากปัญหาการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ไม่เพียงพอ จากกราฟรูปที่ 1.4 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 และเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน สอดคล้องกับปัญหาในกระบวนการผลิตที่ต้องใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินมากขึ้น ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากปัญหานี้จึงทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุคิดเป็นสัดส่วน 25% ของปริมาณการใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุทั้งหมด คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 2 ล้านบาทต่อเดือน

ผู้วิจัยจึงเลือกปัญหาคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุหลังการฟื้นฟูสภาพเรซินมีคุณภาพไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดมาศึกษาเพื่อลดระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน และลดความสูญเสียโอกาสในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ รวมถึงลดค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ผลิตไม่เพียงพอ และเพื่อเพิ่มผลิตภาพของโรงงาน โดยนำแนวคิด ซิกซ์ซิกมา มาใช้งานวิจัยโดยยึดหลักในการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติเป็นสำคัญ ซึ่งแนวคิดซิกซ์ ซิกมามีขั้นตอนการดำเนินงานอย่างเป็นระบบ และใช้เครื่องมือสถิติมาประยุกต์ใช้ในการหาปัจจัยและแก้ไขปัญหาที่ทำให้เกิดของเสีย คือน้ำที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพที่กำหนด เช่น การทดสอบสมมติฐาน การออกแบบการทดลอง เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงเห็นว่าแนวคิด ซิกซ์ ซิกมา เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในการลดสัดส่วนน้ำที่ไม่ผ่านคุณภาพ เพื่อลดเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จากปัญหาเรื่องระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลานานจึงมีการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาตามแนวคิดซิกซ์ ซิกมา โดยใช้แผนภาพแสดงสาเหตุและผลแสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แผนภาพสาเหตุและผลของปัญหา

จากแผนภาพสาเหตุและผลของปัญหา วิเคราะห์โดยใช้หลักการ 5M1E ได้แก่ปัจจัยจากพนักงาน (Man), ปัจจัยนำเข้าในกระบวนการผลิต (Material), เครื่องจักร (Machine), กระบวนการทำงาน (Method), การวัดและเครื่องมือวัด (Measurement) และสภาพแวดล้อม (Environment) จากการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆพบว่าสาเหตุที่เป็นปัจจัยสำคัญคือกระบวนการทำงานที่ไม่ทราบค่าที่เหมาะสม เช่น อัตราเร็วในการชะล้างเรซิน ปริมาณน้ำล้างเรซิน จึงศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่ควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ แสดงดังตารางที่ 1.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

Process	Parameter	unit	Cation	Anion	Mixbed
1. Online	flowrate	l/s	31	31	31
2. Re-generation	acid flow step1	l/s	0.102		0.063
	acid flow step2	l/s	0.206		-
	acid amount	l	238		108.8
	acid dilution flow	l/s	11		2.44
	caustic flow	l/s		0.281	0.11
	caustic amount	l		418	161
	caustic dilution flow	l/s		5.1	2
3. Rinse	**Slow rinse**				
	acid displacement rinse flow	l/s	11		3
	acid displacement rinse amount	l	12200		5850
	caustic displacement rinse flow	l/s		2.7	2.5
	caustic displacement rinse amount	l		13200	4875
	Fast rinse				
	fast rinse flow	l/s	31	31	31
	fast rinse amount	l	6100	6600	6000
	Recirculate rinse				
	recirculate rinse flow	l/s	31	31	31
	recirculate rinse amount	l	until accepted quality water		

จากตารางที่ 1.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุในขั้นตอนการชะล้างเรซิน ประกอบด้วยขั้นตอนการชะล้างเรซินอย่างช้า การชะล้างเรซินอย่างเร็ว และการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ในงานวิจัยนี้จึงสนใจตัวแปรที่จะทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ใช้ระยะเวลาในการชะล้างเรซินน้อยที่สุด

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อลดระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

1) งานวิจัยนี้ศึกษาในโรงงานผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุโดยใช้การแลกปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน (Ion Exchanger Resin) เพื่อการกำจัดไอออนในน้ำกระด้าง
2) ตัวชี้วัดที่ใช้ในงานวิจัยคือ ระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (Recirculation Rinse) ในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ
3) ใช้โปรแกรม MINITAB ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัยมีดังนี้

1) ลดปริมาณน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ไม่ได้คุณภาพหลังกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน
2) ลดความสูญเสียเวลาในการการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน และเพิ่มโอกาสในการผลิตทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ สามารถผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น
3) ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุจากภายนอกอันเนื่องจากผลิตไม่เพียงพอ
4) ผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณที่เพียงพอของน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ยึดหลักแนวคิดซิกซ์ ซิกมา ที่มีขั้นตอนการแก้ปัญหา 5 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ระยะนิยามปัญหา (Define Phase: D)

ก. สำรวจทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุโดยใช้แนวคิด ซิกซ์ ซิกมา เพื่อให้สามารถนำความรู้มาใช้กับงานวิจัย

ข. ศึกษากระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุและรวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

ค. กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมาย ตัวชี้วัด และระยะเวลาของโครงการ

2) ระยะการวัด (Measure Phase: M)

ก. ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันจากกระบวนการผลิตและจัดเก็บจริง บันทึกปัญหาและข้อมูล

ข. วิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด (Gage Repeatability and Reproducibility)

ค. นำข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้มาวิเคราะห์ ทำให้ได้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและจัดเก็บ เพื่อนำไปสู่แนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ง. ระดมสมองหาสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้หลังจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน

3) ระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze Phase: A)

ก. ทำการทดลองปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือกมาจากระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุที่แท้จริง

ข. เลือกสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นมาทำการปรับปรุงโดยจะพิจารณาเฉพาะสาเหตุที่ส่งต่อคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุหลังจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน และมีความเป็นไปได้ที่จะทำการแก้ไขปรับปรุงให้สำเร็จภายใต้ข้อจำกัดเรื่องต้นทุนและระเวลาที่จำกัด

4) ระยะการปรับปรุงแก้ไขของปัญหา (Improve Phase: I)

ก. นำปัจจัยที่เป็นสาเหตุที่แท้จริงมาดำเนินการทดลองโดยใช้วิธีออกแบบการทดลอง (Design of Experimental) เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

ข. กำหนดตัวแปรของกระบวนการและข้อจำกัดที่ส่งผลต่อการทดลอง

ค. พิจารณาเลือกแบบการทดลอง

ง. กำหนดขั้นตอนการทดลองและวิธีการเก็บข้อมูล

จ. ทำการทดลองตามแผนการทดลองที่วางไว้

ฉ. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5) ระยะการตรวจติดตามควบคุมและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Control Phase: C)

ก. นำระดับของปัจจัยที่เหมาะสมใช้จริงในระดับโรงงาน

ข. เก็บรวมรวบข้อมูลหลังการปรับปรุง เพื่อวัดผลหลังการปรับปรุงแก้ไขและเปรียบเทียบผลก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

ค. จัดทำเป็นมาตรฐานในการดำเนินงานการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6) สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เครื่องมือในแนวคิดซิกซ์ ซิกมา มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยผู้วิจัยศึกษาถึงทฤษฎี และงานวิจัยต่างๆเพื่อให้เข้าใจถึงแนวคิดและวิธีการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงและลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยได้เรียบเรียงลำดับเนื้อหาแนวคิดซิกซ์ ซิกมา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma)

2.1.1 ความหมายของซิกซ์ ซิกมา

ความหมายของซิกซ์ ซิกมา มีผู้เชี่ยวชาญหลายท่านกล่าวไว้ดังนี้

(Cherry and Seshadri 2000) ให้ความหมายของซิกซ์ ซิกมาไว้ว่าเป็นแนวทางการจัดการทางคุณภาพ โดยนำการวิเคราะห์ทางสถิติมาใช้ ซึ่ง Sigma มาจากอักษรกรีกที่ใช้ในสถิติ ซึ่งหมายถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Six Sigma (6σ) จึงหมายถึงการมีสัดส่วนของเสีย 3.4 ส่วนในล้านส่วน โดยวิธีการซิกซ์ ซิกมา เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเรื่องคุณภาพโดยแก้ที่สาเหตุหลักของปัญหาโดยใช้สถิติ และนำมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการได้ในระยะยาว

(Harry and Schroeder 2006) กล่าวว่า ซิกซ์ ซิกมาเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพอย่างมากในการบริหาร เป็นรูปแบบการจัดการที่ทำให้องค์กรมุ่งเน้นการพัฒนาและการส่งมอบผลิตภัณฑ์และบริการที่สมบูรณ์ให้ลูกค้าเพื่อความพึงพอใจสูงสุดของลูกค้า โดยการกำจัดข้อบกพร่องที่มีในองค์กร กระบวนการต้องผลิตของเสียไม่เกิน 3.4 ข้อบกพร่องต่อล้านโอกาส ซึ่งทำให้ทั้งลูกค้าและผู้ผลิตได้ผลตอบแทนที่ดีทั้งสองฝ่าย ไม่ว่าจะเป็นด้านคุณภาพ ความพึงพอใจของลูกค้า และต้นทุนคุณภาพในกระบวนการผลิตที่ลดลง

(Banuelas Coronado and Antony 2002) นำเสนอว่าซิกซ์ ซิกมา เป็นกลยุทธ์ในการพัฒนาความสามารถในการทำกำไรในธุรกิจ โดยกำจัดความแปรปรวน ลดของเสีย ลดต้นทุนคุณภาพในกระบวนการ และพัฒนาประสิทธิภาพและประสิทธิผลเพื่อตอบสนองความต้องการและความคาดหวังของลูกค้าเป็นสำคัญโดยใช้เครื่องมือและเทคนิคทางสถิติ

(Schroeder, Linderman et al. 2008) ได้ให้ความหมายของซิกซ์ ซิกมา ไว้ว่าคือการจัดการด้านคุณภาพขององค์กร โดยมีการทำงานเป็นทีมมีผู้เชี่ยวชาญและบุคลากรในการดำเนินงาน โดยซิกซ์ ซิกมามีขั้นตอนในการดำเนินงาน 5 ขั้นตอนคือ DMAIC ได้แก่นิยามปัญหา (Define) การวัด (Measure) การวิเคราะห์หาสาเหตุ (Analyze) การปรับปรุง (Improve) และการติดตามควบคุม

(Control) โดยใช้เครื่องมือทางสถิติและเครื่องมือคุณภาพต่างๆในการดำเนินงาน เช่น การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA), ผังแสดงเหตุและผล (Cause-Effect Diagram) การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control) เป็นต้น

ซิกซ์ ซิกมา (โรจนโรวรรณ 2557) มีความหมายในหลายนัยกล่าวได้ว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นวิสัยทัศน์ ปรัชญา ระบบบริหารคุณภาพ ขั้นตอนและเครื่องมือในการปรับปรุงคุณภาพ หรือระดับคุณภาพของกระบวนการ ดังนี้

วิสัยทัศน์ของซิกซ์ ซิกมา คือ การทำให้ลูกค้าพึงพอใจโดยการส่งมอบสินค้าที่มีคุณภาพระดับโลกหรือระดับซิกซ์ ซิกมา

ปรัชญาของซิกซ์ ซิกมา คือ การประยุกต์แนวทางที่มีโครงสร้างที่เป็นระบบในการปรับปรุงคุณภาพอย่างก้าวกระโดดในทุกๆส่วนของธุรกิจ

ซิกซ์ ซิกมา เป็นระบบบริหารคุณภาพที่มีการจัดการในเรื่องการบริหารทรัพยากรบุคคล เครื่องมือ และเงิน เพื่อสนับสนุนให้เกิดการปรับปรุงงานได้ ในส่วนการบริหารบุคคล ซิกซ์ ซิกมา ได้กำหนดบทบาทและความรับผิดชอบของบุคลากรไว้เป็นตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้มั่นใจได้ว่า องค์กรจะมีบุคลากรที่พร้อมด้วยความรู้และเวลาที่จะดำเนินโครงการปรับปรุงคุณภาพงานได้อย่างสำเร็จ

ซิกซ์ ซิกมา เป็นขั้นตอนและเครื่องมือในการปรับปรุงคุณภาพ ซิกซ์ ซิกมา กำหนดขั้นตอนในการปรับปรุงคุณภาพไว้ ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนก็ได้รวบรวมเครื่องมือหลักๆ ที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนไว้อย่างชัดเจน

2.1.2 แนวคิดของซิกซ์ ซิกมา

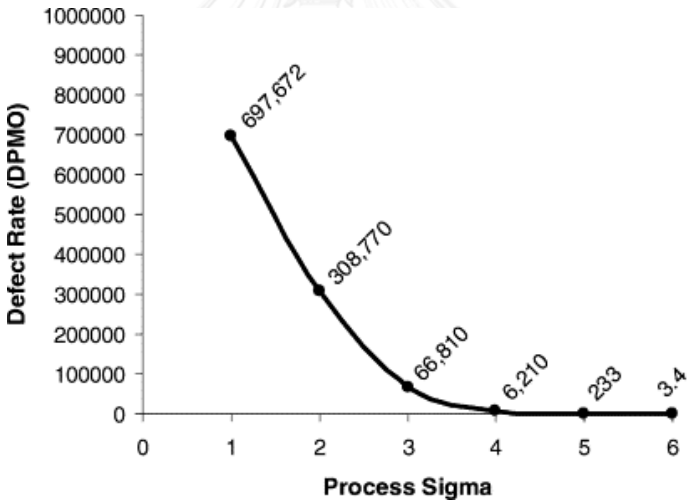
จุดประสงค์หลักของซิกซ์ซิกมาคือการลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์และกระบวนการ เมื่อลดความผันแปรได้ความสูญเปล่า (Waste) จะลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนที่เกิดจากความสูญเปล่าลงได้ แนวคิดหลักของซิกซ์ ซิกมา มีดังต่อไปนี้

1. มุ่งเน้นที่จะปรับปรุงในสิ่งที่ลูกค้าต้องการ
2. ปรับปรุงคุณภาพอย่างเป็นระบบโดยมีขั้นตอนและเครื่องมือทางสถิติและเครื่องมือทางคุณภาพสนับสนุน
3. เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Key Process Output Variables: KPOVs) หรือ Y และปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variables: KPIVs) หรือ X ซึ่งมักจะเขียนแนวคิดนี้ในรูปแบบของ Y = f(X) การจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X ผู้ดำเนินการปรับปรุงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลและวิธีการทางสถิติมาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้ทราบถึงความสัมพันธ์นั้น

4. มีโครงสร้างที่เอื้อให้มีบุคลากรที่พร้อมจะดำเนินงานการปรับปรุงคุณภาพ ในการสร้างให้เกิดความพร้อมนั้น ซิกซ์ ซิกมา จึงได้กำหนดให้ทำการปรับปรุงงานเป็นแบบโครงการ ซึ่งหมายถึงการมีจุดเวลาเริ่มต้นและจุดเวลาสิ้นสุดของการปรับปรุงงานอย่างชัดเจน นอกจากนั้น ซิกซ์ ซิกมา ยังได้กำหนดบทบาทและความรับผิดชอบของบุคลากรไว้เป็นตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าองค์กรจะมีบุคลากรที่พร้อมด้วยความรู้และเวลาที่จะดำเนินโครงการปรับปรุงคุณภาพงานได้อย่างสำเร็จ

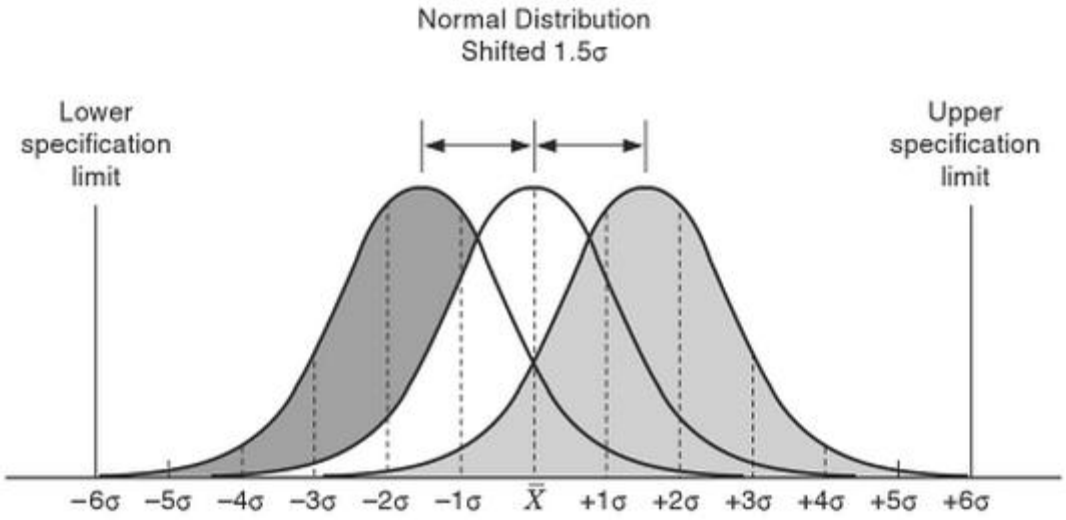
2.1.3 ตัววัดระดับคุณภาพ

ตัววัดระดับคุณภาพในกระบวนการผลิต บ่งบอกถึงคุณภาพของกระบวนการ ในแนวคิดซิกซ์ ซิกมา อ้างอิงค่า Sigma Quality Level เพื่อบ่งบอกถึงระดับคุณภาพของกระบวนการ ค่าระดับ Sigma Quality Level แสดงได้รูปที่ 2.1 (Linderman, Schroeder et al. 2003)



รูปที่ 2.1 จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละ Sigma Quality Level เมื่อ mean shift $\pm$ 1.5σ

จากกราฟรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าที่ระดับซิกมา สูงขึ้นจะมีจำนวนของเสียลดลง บ่งบอกถึงคุณภาพของกระบวนการที่ดีมากขึ้น และที่ระดับ ซิกซ์ ซิกมา ($\pm$6σ) มีโอกาสเกิดของเสีย 3.4 ส่วนในล้านส่วน ดังแสดงได้ดังกราฟเส้นโค้งการกระจายตัวปกติในกราฟรูปที่ 2.2 (Breyfogle III 2003)



Spec. limit	Percent	Defective ppm
±1 σ	30.23	697700
±2 σ	69.13	308700
±3 σ	93.32	66810
±4 σ	99.3790	6210
±5 σ	99.97670	233
±6 σ	99.999660	3.4

รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการกระจายตัวปกติภายใต้ Six Sigma Quality Level เมื่อ mean shift $\pm$ 1.5σ

จากรูปที่ 2.2 กราฟแสดงเส้นโค้งการกระจายตัวปกติภายใต้ Six Sigma Quality Level ซึ่งมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ โดยตามหลักสถิติความกว้างของฐานจะเท่ากับ 6σ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระบวนการทำงานที่ระดับ "Six Sigma" มีผลิตภัณฑ์ของดี 99.99966% โดยปราศจากข้อบกพร่อง (หรือมีโอกาสเกิดของเสีย 3.4 ส่วนในล้านส่วน) ภายใต้ข้อกำหนดเฉพาะด้านล่างและด้านบน

หากคำนวณเป็นค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ จะได้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการที่ระดับ ซิกซ์ ซิกมา Cp เท่ากับ 2.0 และ Cpk เท่ากับ 1.5 (Chou and Owen 1989) โดยคิดที่ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางของการกระจายเท่ากับ $\pm$ 1.5σ

กล่าวได้ว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นเครื่องมือและแนวคิดในการปรับปรุงคุณภาพในองค์กรเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุดโดยใช้หลักการทางสถิติ และมุ่งเน้นลูกค้าเป็นหัวใจสำคัญในการแก้ไขปัญหาเพื่อการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการรวมทั้งลดผลกระทบและค่าใช้จ่าย โดยชื่อของ Six Sigma (6σ) นั้นได้มาจากแนวความคิดที่ว่าโอกาสที่เกิดขึ้น 3.4 ครั้งต่อการผลิตหรือการปฏิบัติงาน 1 ล้านครั้ง

2.2 การปรับปรุงคุณภาพตามแนวคิดซิกซ์ ซิกมา

กระบวนการมาตรฐานของซิกซ์ ซิกมา ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนสำคัญคือ DMAIC (Meng, Lu et al. 2011, Cheng, Azman et al. 2014) ได้แก่ ระยะนิยามปัญหา (Define Phase) ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase) ระยะการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Analyze Phase) ระยะการปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase) และระยะการติดตามควบคุมกระบวนการ (Control Phase) ซึ่งมีรายละเอียดและเครื่องมือคุณภาพที่นำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละกระบวนการดังนี้

2.2.1 ระยะนิยามปัญหา (Define Phase)

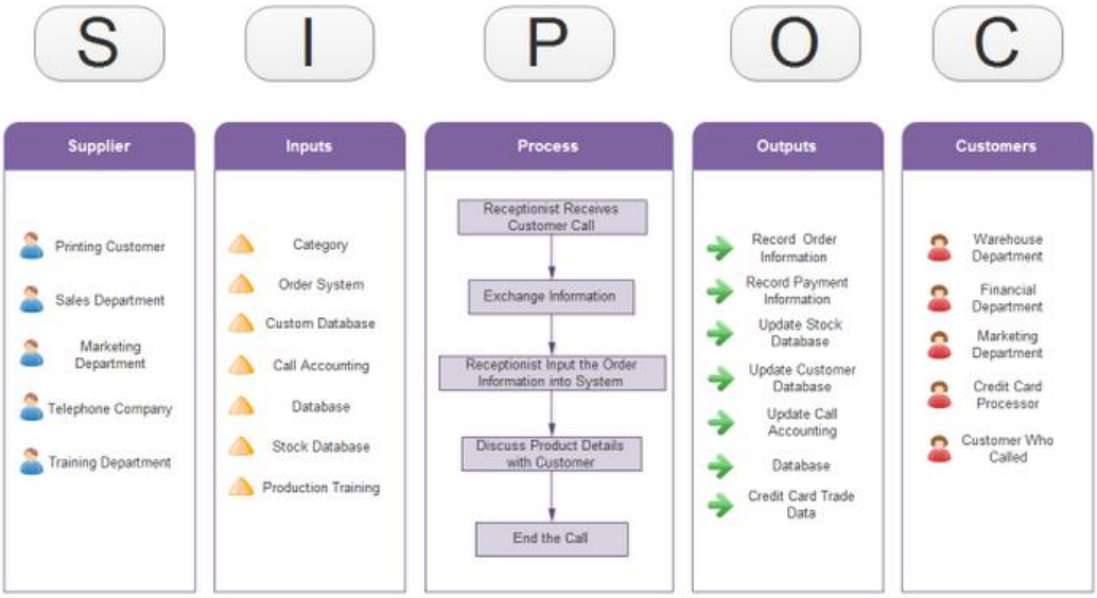
ขั้นตอนของการกำหนดปัญหา เป็นการเลือกการปรับปรุงหรือออกแบบ ทั้งนี้เน้นความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก เพื่อให้โครงการที่เลือกจะทำนั้นเป็นเรื่องสำคัญ ๆ จริง ทำแล้วคุ้มค่า ตรงประเด็น ไม่เสียเวลาเปล่า เมื่อระบุปัญหาแล้ว ต้องกำหนดขอบเขต วัตถุประสงค์ เงื่อนไข และสมมติฐานของโครงการปรับปรุงคุณภาพ รวมทั้งกำหนดทีมงานปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งระยะนิยามปัญหานี้มีเครื่องมือที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.2.1.1 ผังกระบวนการ (Process Mapping)

ผังกระบวนการเป็นผังที่ทำให้เห็นกระบวนการทำงานผ่านขั้นตอนใดบ้างและมีปัจจัยใดที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น แผนผังกระบวนการระดับสูง (High-Level Process Map) หรือแผนผัง SIPOC (SIPOC Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการระดับสูง

ขั้นตอนนี้จะช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของกระบวนการที่เกี่ยวของกับโครงการที่เลือกมาทำการปรับปรุง โดยจะนำมาใช้ในการสื่อสารระหว่างกันในทีมเกี่ยวกับขอบเขตโครงการ การเก็บข้อมูล และการระบุตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แผนผังกระบวนการ SIPOC สำหรับการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แผนผังกระบวนการ SIPOC สำหรับการวิเคราะห์

2.2.2 ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase)

ขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา จะมีการเก็บข้อมูลเพื่ออธิบายสภาพปัญหา และเป็นข้อมูลสนับสนุนในการกำหนดสาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหา การเก็บข้อมูลเพื่อทำการประเมินและวัดผลการปฏิบัติงานมีตัวชี้วัดต่างๆ เช่น สัดส่วนของเสีย อัตราการเกิดข้อบกพร่องต่อหน่วย รอบเวลาของกระบวนการ(Process Cycle Time) อัตราส่วนผลดีที่ผลิตได้ (Rolled Throughput Yield) ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) เป็นต้น และก่อนที่จะเก็บข้อมูลจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดเสียก่อน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าระบบการวัดจะให้ค่าที่เชื่อถือได้โดยการทำ Gage Repeatability and Reproducibility (GR&R) จากนั้นศึกษาหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหา วิเคราะห์ คัดกรอง และจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุที่เป็นไปได้ เพื่อเลือกสาเหตุหลักที่คาดว่าจะมีผลกระทบรุนแรงมาแก้ไขปัญหาในกระบวนการ

2.2.2.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA)

การวิเคราะห์ระบบการวัด มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ถึงแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนในระบบการวัด เพื่อยืนยันความถูกต้องและความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากการวัดก่อนการปรับปรุงกระบวนการ ระบบการวัดที่ดีต้องมีทั้งความแม่น (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ความแม่น

จะพิจารณาในเรื่องของการที่ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริง ส่วนความเที่ยงนั้น จะพิจารณาในเรื่องที่ค่าที่วัดได้หลายๆ ครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งการวิเคราะห์ระบบการวัดนี้จะใช้วิธีการวัด GR&R

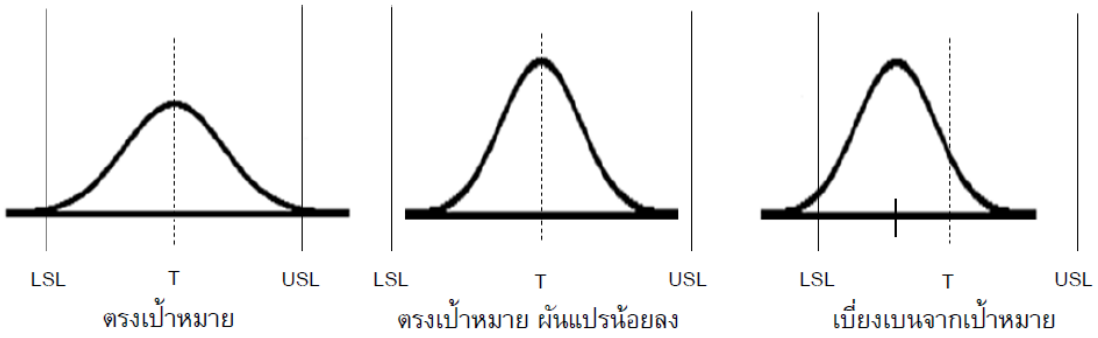
ในเรื่องความแม่น จะพิจารณาใน 3 เรื่อง คือคุณสมบัติด้านไบอัสของระบบการวัด, คุณสมบัติด้านเสถียรภาพของระบบการวัด และคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด ในการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความเที่ยงของระบบการวัด จะวิเคราะห์ความผันแปรด้าน Repeatability และReproducibility

(AIAG 2002) นิยามความหมายของค่าต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบการวัดไว้ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- ไบอัส (Bias) แสดงถึง ความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้บนคุณลักษณะและชิ้นงานเดียวกัน
- ความเสถียร (Stability) แสดงถึง การเปลี่ยนแปลงของค่าไบอัสเมื่อเวลาเปลี่ยนไป
- ความผันแปรเชิงเส้นตรง (Linearity) จะพิจารณาในเรื่องการเปลี่ยนแปลงของค่าไบอัสเมื่อเปลี่ยนแปลงย่านวัด
- รีพีททะบิลิตี้ (Repeatability) แสดงถึงความผันแปรของค่าวัดที่ถูกวัดโดยพนักงานวัดคนเดียวกัน โดยเครื่องมือวัดเดียวกัน ในการวัดชิ้นงานเดียวกันซ้ำๆ โดยทั่วไปมักจะแสดงถึงความผันแปรของเครื่องมือวัด
- รีโปรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) หมายถึงความผันแปรที่แสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้เครื่องมือวัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปมักแสดงถึงความแตกต่างของค่าวัดระหว่างพนักงานวัดต่างคนกัน

2.2.2.2 ตัวชี้วัดความสามารถของกระบวนการ

ความสามารถของกระบวนการเป็นการแสดงความสามารถของกระบวนการในการผลิตสินค้าได้ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งกำหนดในลักษณะของขีดจำกัดข้อกำหนด (Specification Limits) โดยคำนึงถึงความผันแปรของกระบวนการและการเข้าใกล้ของค่ากลางของกระบวนการเทียบกับค่าเป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แนวคิดของความสามารถกระบวนการ

<u>ตัวชี้วัดความสามารถของกระบวนการ</u>

ตัวชี้วัดความสามารถของกระบวนการมีเป็นจำนวนมาก เช่น สัดส่วนของเสีย อัตราการเกิดข้อบกพร่องต่อหน่วย รอบเวลาของกระบวนการ(Process Cycle Time) อัตราส่วนผลดีที่ผลิตได้ (Rolled Throughput Yield) ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) เป็นต้น มีรายละเอียดดังนี้

1. สัดส่วนของเสีย สามารถคำนวณได้จากจำนวนของเสียที่ตรวจพบจากจำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ
2. อัตราผลิตผลดีจากกระบวนการ (Throughput Yield, Y_{TP}) คือ อัตราส่วนของจำนวนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการที่กำหนดโดยปราศจากข้อผิดพลาด ซึ่งแสดงถึงความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะเกิดผลิตผลไม่ตรงตามข้อกำหนดทางคุณภาพ (Non-Conformance)
3. รอบเวลาของกระบวนการ (Process Cycle Time) หมายถึง อัตราส่วนของเวลาที่ใช้จริงในการผลิตสินค้าต่อหนึ่งหน่วย

2.2.2.3 การระดมความคิด (Brainstorming)

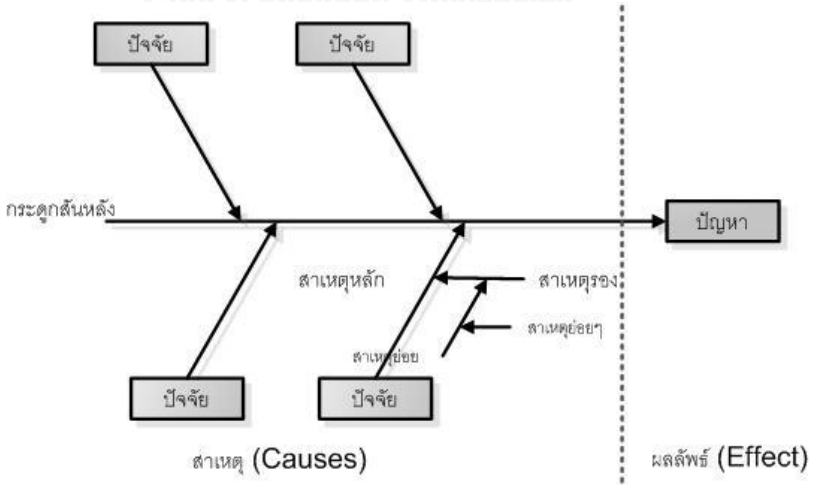
การระดมความคิดเป็นกระบวนการที่มีแบบแผนที่ใช้เพื่อรวบรวมความคิดเห็น ปัญหา หรือข้อเสนอแนะ การระดมสมองเป็นวิธีการประชุมชนิดหนึ่งที่ให้ประสิทธิภาพมาก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้ในการเลือกปัญหา หาสาเหตุของปัญหา และวิธีการแนวทางในการแก้ปัญหา โดยใช้ความคิดเห็นของกลุ่มบุคคลในการตัดสิน

หลักในการระดมความคิดมีดังนี้

1. กำหนดประเด็นในการระดมสมองให้ชัดเจน
2. เปิดโอกาสให้สมาชิกทุกคน ได้แสดงความคิดเห็นอย่างเป็นอิสระ โดยไม่ต้องกลัวการถูกวิจารณ์ว่าเป็นความคิดที่ไม่ดี
3. รับฟังความคิดเห็นของผู้อื่น และหลีกเลี่ยงการวิจารณ์
4. มุ่งเน้นให้มีปริมาณของความคิดเห็น ให้ออกมายิ่งมากยิ่งดี โดยที่ยังไม่ต้องพิจารณาข้อเท็จจริงและเหตุผล (Free Thinking)
5. พยายามให้สมาชิกมีแนวความคิดออกมาหลากหลาย
6. บันทึกความคิดให้สมาชิกทุกคนเห็นซึ่งจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการต่อยอดความคิด

2.2.2.4 ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

แผนผังแสดงเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (All Causes) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) แผนผังสาเหตุและผลจะช่วยให้การระดมสมองเป็นระบบมากขึ้น เนื่องจากมีการแยกหมวดหมู่ของสาเหตุไว้ตั้งแต่ก่อนการเริ่มลงความเห็น โดยในแต่ละปัจจัยจะระดมสมองหาสาเหตุด้วยคำว่า “ทำไม” และหยุดเมื่อเห็นสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ทำให้เห็นแนวทางการแก้ปัญหาได้ โครงสร้างของแผนผังแสดงเหตุและผลแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแผนผังแสดงเหตุและผล

การวิเคราะห์แผนผังแสดงเหตุและผลพิจารณาแยกสาเหตุหลักของปัญหาออกเป็น 6 ปัจจัยดังนี้

1. สาเหตุจากพนักงาน (Man)
2. สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine)
3. สาเหตุจากวิธีการทำงาน (Method)
4. สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material)
5. สาเหตุจากระบบการวัด (Measurement)
6. สาเหตุจากสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต (Environment)

2.2.2.5 ตารางแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

ตารางแสดงเหตุและผลเป็นการจัดลำดับปัจจัยตัวแปรนำเข้าทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ผังแสดงเหตุและผลมาทำการวิเคราะห์เพื่อเรียงลำดับความสำคัญและกรองปัจจัยเหล่านั้นด้วยเมทริกซ์แสดงเหตุและผล โดยใช้ความชำนาญและประสบการณ์ของผู้ชำนาญและผู้ปฏิบัติงาน โดยตารางแสดงเหตุและผลจะทำการประเมินคะแนนผลกระทบของตัวแปรนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนองดังนี้

0 หมายถึง ตัวแปรนำเข้าไม่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง

1 หมายถึง ตัวแปรนำเข้ามีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองน้อย

3 หมายถึง ตัวแปรนำเข้ามีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองปานกลาง

9 หมายถึง ตัวแปรนำเข้ามีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองสูง

จากการประเมินให้คะแนนผลกระทบของตัวแปรนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนองแล้ว จะนำคะแนนประเมินที่ได้มาเรียงลำดับด้วยแผนภูมิพาเรโตเพื่อเรียงลำดับปัจจัยตามลำดับผลกระทบ ทำให้สามารถพิจารณาปัจจัยลำดับต้นๆ ไปคัดกรองต่อด้วยเกณฑ์การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ต่อไป

2.2.2.6 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการระบุความเสี่ยงสัมพัทธ์ในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือออกแบบกระบวนการ โดยเริ่มต้นการดำเนินการเพื่อลดความเสี่ยงของผลกระทบที่เป็นไปได้มากที่สุด และติดตามผลของแผนการดำเนินงานเกี่ยวกับ

การลดความเสี่ยง FMEA สามารถใช้ได้ในหลายขั้นตอนของการดำเนินการ เช่น ตั้งแต่ในขั้นตอนของการออกแบบ หรือในขั้นตอนของการคัดเลือกสาเหตุ เกณฑ์ของ FMEA สามารถนำมาใช้ในขั้นตอนการคัดกรองสาเหตุที่ควรจะนำไปแก้ไขในลำดับต้นๆได้

วิธีการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

1. กำหนดหัวข้อดังนี้
    - ความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นได้
    - ผลกระทบของความล้มเหลว
    - สาเหตุของความล้มเหลว
2. ประเมินให้คะแนนในหัวข้อดังนี้
    - ระดับความรุนแรงของผลกระทบ (Severity)
    - ความถี่ของการเกิดสาเหตุของความล้มเหลว (Occurrence)
    - ระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหานั้นก่อนที่จะส่งมอบ (Detection)
3. จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุที่ก่อให้เกิดความล้มเหลวโดยเรียงตามค่าตัวเลขลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number, RPN) คำนวณได้จาก S x O x D มาจากความรุนแรงของผลกระทบ (Severity – S) คูณด้วยโอกาสการเกิด (Occurrence – O) และคูณด้วยการตรวจจับ (Detection – D)

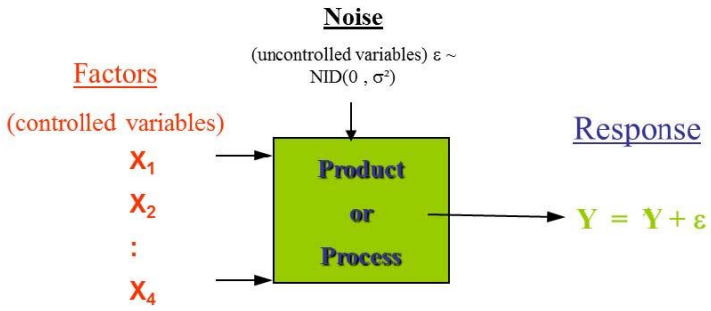
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3 ระยะการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)

หลังจากคัดกรองจำนวนสาเหตุหรือปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหา จะนำไปทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าสาเหตุหรือปัจจัยใดมีนัยสำคัญต่อปัญหา จะได้นำไปสู่การปรับปรุงที่ตรงจุดในขั้นตอนต่อไป โดยในขั้นตอนนี้จะมีการออกแบบการทดลอง เก็บผลการทดลอง และนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติ เช่น การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ช่วยในการออกแบบการเก็บข้อมูลในการทำการทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของสาเหตุของปัญหา การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) เพื่อพิสูจน์ความมีนัยสำคัญของสาเหตุที่สงสัย

2.2.3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

การออกแบบการทดลอง (Montgomery 2008) คือการออกแบบแผนการทดลองเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรนำเข้ามีผลกระทบต่อค่าตัวแปรตอบสนองอย่างไร โดยทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยนำเข้าของกระบวนการที่จะทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์สังเกตผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองปรับเปลี่ยน โดยที่ตัวแปรนำ เข้านั้นสามารถที่จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น อุณหภูมิภายนอก ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม (ซึ่งในบางระบบอาจพิจารณาให้เป็นตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้) อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังความสัมพันธ์ของปัจจัยในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีแนวทางในการออกแบบการทดลองต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แบบการทดลองแฟคทอเรียล ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบนี้จะช่วยประหยัดจำนวนการทดลอง (Runs) ให้มีเท่าที่จำเป็นในการให้ได้ข้อมูลเพื่อสรุปผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตอบสนองซึ่งมี ซึ่งการออกแบบการทดลองที่ใช้ในระยะการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหามีจุดประสงค์เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^{k-1} โดยนิยมใช้กับปัจจัย 5 ตัวแปรขึ้นไป เนื่องจากให้คุณภาพของผลสรุปที่จะได้จากผลการทดลอง (Resolution) ที่ยอมรับได้และทำการทดลองเท่าที่จำเป็น

2.2.3.2 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

(Montgomery and Runger 2010) เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในทางสถิติ โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างจากประชากรแล้วอาศัยการแจกแจงทางสถิติเพื่อทดสอบเกี่ยวกับสิ่งที่จะทำการศึกษาสมมุติฐานที่จะทดสอบ เรียกว่า สมมุติฐานหลัก (Null Hypothesis) แทนด้วย H_0 สมมุติฐานที่จะมา

แย้งกับสมมุติฐานหลักเรียกว่า สมมุติฐานรอง (Alternative Hypothesis) ซึ่งแทนด้วย H_1 โดยสมมุติฐานรองนี้จะตั้งให้สอดคล้องกับสิ่งที่นักวิจัยอยากรู้ เนื่องจากสมมุติฐานที่จะทำการทดสอบเป็นความเชื่อเกี่ยวกับลักษณะของประชากรยังไม่สามารถที่จะบอกได้ว่าจะเป็นจริงหรือเท็จ จนกว่าที่จะทำการพิสูจน์โดยเก็บรวบรวมข้อมูลมาวิเคราะห์ แต่เนื่องจากการเก็บข้อมูลทั้งหมดจากประชากรนั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ยากเพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลามาก จึงได้เพียงทำการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบ ในการที่จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมุติฐานหลักนั้นเราจะพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากการคำนวณทางสถิติ (P-value) โดยหลักการของการทดสอบสมมติฐานจะอาศัยระดับนัยสำคัญ เพื่อทดสอบว่า ผลจากการทดลองมีค่าแตกต่าง มากกว่าหรือน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ซึ่งโดยส่วนมากจะกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% หรือมีนัยสำคัญที่ α เท่ากับ 0.05 โดยที่ผลการตัดสินใจจากการทดสอบสมมุติฐานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลจากการตัดสินใจจากการทดสอบสมมุติฐาน

การตัดสินใจ	ข้อเท็จจริงของ H_0	
	H_0 เป็นจริง	H_0 ไม่เป็นจริง
ปฏิเสธ H_0	ความผิดพลาดประเภทที่ 1	ตัดสินใจถูกต้อง
ไม่ปฏิเสธ H_0	ตัดสินใจถูกต้อง	ความผิดพลาดประเภทที่ 2

จากตารางที่ 2.1 ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type 1 error) คือความน่าจะเป็นที่จะปฏิเสธสมมุติฐานหลักทั้งที่สมมุติฐานหลักเป็นจริง แทนด้วย α เราเรียกว่าระดับนัยสำคัญ (Significant level) ในขณะที่ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type 2 error) คือความน่าจะเป็นที่จะยอมรับสมมุติฐานหลักทั้ง ๆ ที่สมมุติฐานหลักไม่เป็นจริง แทนด้วย β ในการทดสอบสมมุติฐานนั้นสามารถที่จะทำการทดสอบได้ทั้งในส่วนของค่าเฉลี่ย μ และค่าความแปรปรวน σ

2.2.4 ระยะการปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase)

หลังจากกระบวนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา และคัดเลือกตัวแปรที่มีผลมากต่อปัญหาแล้ว จะดำเนินการแก้ไข/ปรับปรุงเพื่อขจัดสาเหตุที่วิเคราะห์ได้ โดยใช้เครื่องมือทางสถิติที่สำคัญเช่น การออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อขจัดหรือควบคุมตัวแปรที่วิเคราะห์ได้ โดยการออกแบบการทดลองในขั้นตอนนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) มีจุดประสงค์เพื่อการทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ

2.2.4.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design)

(ชุติมา 2545) ได้อธิบายถึงการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design) เป็นการศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนอง ทดสอบเพื่อหาว่าปัจจัยใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ในทุกๆระดับของปัจจัยนำเข้าที่มีจำนวน 2 ปัจจัยขึ้นไป แบบการทดลองประเภทนี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ

1. การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial design)
2. แบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial design)

ผลกระทบของปัจจัยแบ่งเป็นผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย โดยในการทดลองที่มีจำนวนปัจจัย k ปัจจัย จะสามารถประมาณค่าผลกระทบได้ทั้งหมดจำนวน 2k -1 ผลกระทบ รวมกับอีกหนึ่งส่วนคือค่าจุดตัดแกน Y ซึ่งเป็นค่าตอบสนองโดยเฉลี่ย

ผลกระทบหลักของปัจจัยคือ ค่าที่แสดงถึงผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง พิจารณาได้จากกราฟ Main Effect Plot

ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยคือค่าที่แสดงถึงความแตกต่างของผลกระทบของปัจจัยหนึ่งที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง พิจารณาได้จากกราฟ Interaction Plot

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.5 ระยะการติดตามควบคุมกระบวนการ (Control Phase)

ขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการซิกซ์ ซิกมาคือการควบคุมกระบวนการ เพื่อให้กระบวนการนิ่งมีความสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้เกิดข้อบกพร่องซ้ำ โดยกำหนดวิธีการในการรักษาระดับคุณภาพหลังการปรับปรุงให้คงอยู่อย่างต่อเนื่อง สิ่งสำคัญที่ต้องทำคือการเขียนแผนควบคุมอยู่ในรูปแบบของตารางที่แสดงถึงสิ่งที่จะควบคุมในแต่ละกระบวนการ วิธีการและเครื่องมือที่จะใช้ ความถี่และขนาดตัวอย่างและผู้รับผิดชอบ เครื่องมือที่นำใช้ในการติดตามควบคุมกระบวนการได้แก่ แผนภูมิควบคุม (Control Charts) ซึ่งเป็นหนึ่งในเครื่องมือคุณภาพพื้นฐาน (QC 7 Tools) แผนการชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ (Acceptance Sampling Plan) ระบบการควบคุมแบบ 5ส และเอกสารวิธีการทำงาน (Work Instruction, WI) เป็นต้น

2.2.5.1 เอกสารวิธีการทำงาน (Work Instruction, WI)

คู่มือการปฏิบัติงาน (Work Manual) เป็นเอกสารที่อธิบายถึงขั้นตอนการปฏิบัติงาน และวิธีการควบคุมกระบวนการทำงาน องค์ประกอบของคู่มือการปฏิบัติงานมีดังนี้

1. วัตถุประสงค์ เป็นการชี้แจงให้ทราบถึงวัตถุประสงค์ของการจัดทำเอกสารฉบับนี้
2. ขอบเขต เป็นการชี้แจงให้ทราบถึงขอบเขตของกระบวนการในเอกสารว่าครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนใดถึงขั้นตอนใด ที่หน่วยงานใด กับใคร ที่ไหน และเมื่อไร
3. คำจำกัดความ เป็นการชี้แจงให้ทราบถึงคำศัพท์เฉพาะที่จะกล่าวถึงในเอกสาร ซึ่งอาจเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ หรือคำย่อ เพื่อให้เป็นที่เข้าใจตรงกัน
4. หน้าที่ความรับผิดชอบ เป็นการชี้แจงให้ทราบว่ามีใครบ้างที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระเบียบปฏิบัติหรือที่เรียกว่าคู่มือการปฏิบัติงานนั้นๆ บ้าง ซึ่งมักจะไล่เรียงจากผู้อำนาจหรือตำแหน่งสูงสุดลงมา
5. ขั้นตอน/ระเบียบปฏิบัติ เป็นการอธิบายขั้นตอนการทำงานอย่างละเอียด ว่าใคร ทำอะไร ที่ไหน อย่างไร เมื่อไร โดยสามารถจัดทำได้ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การใช้ข้อความอธิบาย การใช้ตารางอธิบาย การใช้แผนภูมิ การใช้ Flowchart
6. เอกสารอ้างอิง เป็นการชี้แจงให้ทราบว่ามีเอกสารอื่นใดที่ต้องใช้ประกอบคู่กันหรืออ้างอิงถึงกัน เพื่อให้การปฏิบัติงานนั้นๆ สำเร็จลุล่วง เช่น ระเบียบปฏิบัติเรื่องอื่นๆ ที่ต่อเนื่องกัน พระราชบัญญัติ กฎหมาย กฎระเบียบ หรือวิธีการทำงาน (work instruction) เป็นต้น
7. แบบฟอร์มที่ใช้ เป็นการชี้แจงให้ทราบถึงแบบฟอร์มต่างๆ ที่ต้องใช้ในการบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติตามเอกสารนั้นๆ
8. เอกสารบันทึก เป็นการชี้แจงให้ทราบว่าบันทึกใดบ้างที่ต้องจัดเก็บเพื่อเป็นข้อมูลหรือหลักฐานของการปฏิบัติงานนั้นๆ พร้อมทั้งระบุถึงผู้รับผิดชอบในการจัดเก็บ สถานที่ ระยะเวลา และวิธีการจัดเก็บ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ประโยชน์ของคู่มือการปฏิบัติงานและวิธีการทำงาน</u>

- เพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาด
- เพื่อให้การปฏิบัติงานเป็นไปตามวิธีการเดียวกัน

- ใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุม ตรวจสอบผลการปฏิบัติงาน
- เป็นพื้นฐานในการฝึกอบรมพนักงานใหม่
- ใช้เป็นเป็นสื่อในการประสานงาน
- เป็นแนวทางในการทบทวนและตรวจติดตามคุณภาพภายใน

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

ธรรมชาติโดยทั่วไปของน้ำจะประกอบด้วยแร่ธาตุที่อยู่ในรูปของไอออน ทั้งที่เป็นไอออนบวก (Cation) และไอออนลบ (Anion) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic Matter) ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของไอออนบวกและไอออนลบต่างๆ ในน้ำ

Major	
Cations	***Anions***
Calcium (Ca^{2+})	Bicarbonate (HCO_3^-)
Magnesium (Mg^{2+})	Sulphate (SO_4^{2-})
Sodium (Na^+)	Chloride (Cl^-)
Potassium (K^+)	Silica (SiO_2^{2-})*
Minor	
Cations	***Anions***
Barium (Ba^{2+})	Carbornate (CO_3^{2-})
Iron (Fe^{2+} , Fe^{3+})	Nitrate (NO_3^-)
Manganese (Mn^{2+} , Mn^{3+})	Phosphate (PO_4^{3-})
Aluminium (Al^{3+})	Sulphide (S^{2-})
Ammomium (NH_4^+)	Fluoride (F^-)
Strontrium (Sr^{2+})	Carbondioxide (CO_2)**

* silica มีหลาย form ทั้งที่เป็นกรดอ่อน และ polymer

** CO_2 ละลายน้ำแล้วจะให้กรดคาร์บอนิค

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าธรรมชาติโดยทั่วไปของน้ำมีทั้งไอออนบวกและไอออนลบอยู่ในน้ำ ดังนั้นการผลิตน้ำที่ปราศจากแร่ธาตุหรือน้ำอ่อน (Demineralized Water) จึงมีจุดประสงค์เพื่อกำจัดไอออนเหล่านี้โดยโรงงานกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน (Ion Exchanger Resin) ในการกำจัดไอออนในน้ำกระด้าง

ประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ตัณฑุลเวศม์ 2542) เรซินแต่ละชนิดสามารถเปรียบเทียบได้กับกรดหรือด่าง แบ่งได้ 4 ชนิด

1. เรซินแบบกรดแก่ (Strong acidic cationic resin, SAR)
2. เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acidic cationic resin, WAR)
3. เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic anionic resin, SBR)
4. เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic anionic resin, WBR)

เรซินแบบกรดแก่ (Strong acidic cationic resin, SAR)

หน้าที่ของเรซินแบบกรด (ทั้งแก่และอ่อน) คือใช้ไอออนบวกของตัวเอง (มักเป็น H^+ หรือ Na^+) แลกกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+}, Mg^{2+}

เรซินแบบกรดแก่จะมีหมู่ซัลโฟนิกจับติดอยู่กับโครงร่างไฮโดรคาร์บอน หมู่ซัลโฟนิกอาจอยู่ในรูปของ H^+ เช่น $SO^{3-}H^+$ หรืออยู่ในรูปของ Na^+ เช่น $SO^{3-}Na^+$

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มี H^+ หรือ Na^+ ดังสมการ

$$RSO_3Na_2^+ + Ca^{2+} \longrightarrow RSO_3Ca^{2+} + 2Na^+$$

$$RSO_3H_2^+ + Ca^{2+} \longrightarrow RSO_3Ca^{2+} + 2H^+$$

เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acidic cationic resin, WAR)

เรซินแบบกรดอ่อนมีหมู่คาร์บอกซิลิกจับอยู่กับ H^+ หรือ Na^+ (COO^-H^+ หรือ COO^-Na^+)

เรซินจะใช้ไอออนบวกของตนแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่จับกับไบคาร์บอเนตในน้ำ ดังสมการ

$$RCOOH + NaHCO_3 \longrightarrow RCOONa + CO_2 + H_2O$$

$$2RCOOH + Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow (RCOO)_2Na + 2CO_2 + 2H_2O$$

เรซินแบบกรดอ่อนสามารถกำจัดความกระด้างชั่วคราวได้ แต่ไม่สามารถกำจัดความกระด้างถาวร เช่น $CaSO_4$, $MgSO_4$ เป็นต้น

เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic anionic resin, SBR)

เรซินแบบด่างแก่มีหน้าที่หลักคือ ใช้อิออนลบของตัวเอง (OH- หรือ Cl-) แลกกับอิออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^- หมู่ไอออนของเรซินแบบด่างแก่ ได้แก่ Quaternary amine เช่น $(CH_3)_3CH_2N^+$ ไอออนอิสระมักเป็น OH^- หรือ Cl^-

เรซินแบบด่างแก่ในรูป Cl^- (เรซินในรูป OH^- ใช้ไม่ได้) ใช้กำจัดความเป็นด่างออกจากน้ำ (HCO_3^-) และยังสามารถในแลกเปลี่ยนซิลิกาและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ด้วย

เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic anionic resin, WBR)

เรซินแบบนี้มีกลไกในการกำจัดไอออนแตกต่างจากเรซิน 3 ชนิดแรก เนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, H_2SO_4, HNO_3 ออกจากน้ำ หรืออีกนัยหนึ่ง เรซินแบบด่างอ่อนสามารถกำจัดไอออนลบของกรดแก่ได้ คือ SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3

หลักการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน

การแลกเปลี่ยนไอออนโดยไอออน (Peters 1982) ที่มีประจุจะถูกดูดซับโดยเรซิน โดยการใช้เรซินผลิตน้ำบริสุทธิ์สามารถทำได้หลายวิธี แต่ทุกวิธีจะต้องมีเรซิน 2 ชนิด คือ เรซินแบบด่างและเรซินแบบกรด ซึ่งอาจบรรจุแยกถังหรือบรรจุในถังเดียวกัน (Mixed bed) ก็ได้ เรซินแบบด่างซึ่งทำการรีเจนเนอเรตได้ด้วยโซดาไฟจะทำหน้าที่กำจัดไอออนลบรวมทั้ง SiO_2 และ CO_2 ออกจากน้ำ ส่วนเรซินแบบกรด ซึ่งสามารถรีเจนเนอเรตด้วยกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน จะทำหน้าที่กำจัดไอออนบวกออกจากน้ำ น้ำที่ผลิตได้จึงเป็นน้ำที่ปราศจากเกลือแร่ต่างๆ (Deminerized Water)

หน้าที่ของระบบแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ประการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน คือ

1. กำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^- เป็นต้น
2. ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากๆ งานส่วนนี้เกิดขึ้นหลังจากได้น้ำสะอาดแล้ว โดยไอออนที่หลุดออกมาจากสารละลายจะหลุดออกมากับสารรีเจนเนอแรนต์ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน เนื่องจากปริมาตรของสารละลายรีเจนเนอแรนต์ต่ำกว่าปริมาตรสารละลายซึ่งเป็นที่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงมาก เท่ากับเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจากมาก มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายเท่า

ขั้นตอนการทำงานในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

การทำงานในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุมีขั้นตอนดังนี้

1. การแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online)
2. การล้างย้อน (Backwash)
3. การฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regeneration)
4. การชะล้างสารเคมี (Rinse)

การแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online)

Mill water ถูกส่งผ่าน Cation exchanger tank โดยการไหลเป็นแบบ up flow ซึ่งภายในถังจะบรรจุ เรซินชนิดกรดแก่ (Amberjet 1200Na) มีลักษณะเป็นเม็ดกลมข้างในเป็นรูพรุน จะทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ดังสมการ

$$H^+ H^+ + CaSO_4 \longrightarrow Ca^{2+} + H_2SO_4$$

$$H^+ + NaCl \longrightarrow Na^+ + HCl$$

$$H^+ H^+ + Mg(HCO_3)_2 \longrightarrow Mg^{3+} + H_2CO_3$$

จาก Cation exchanger tank น้ำจะถูกปั๊มเข้าสู่ Anion exchanger tank โดยการไหลแบบ up flow ภายในถังบรรจุเรซินชนิด amberlite IRA 93 RF และ amberjet 4200 Cl ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเรซินใน Cation Exchanger Tank แต่จะทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (anion) ดังสมการ

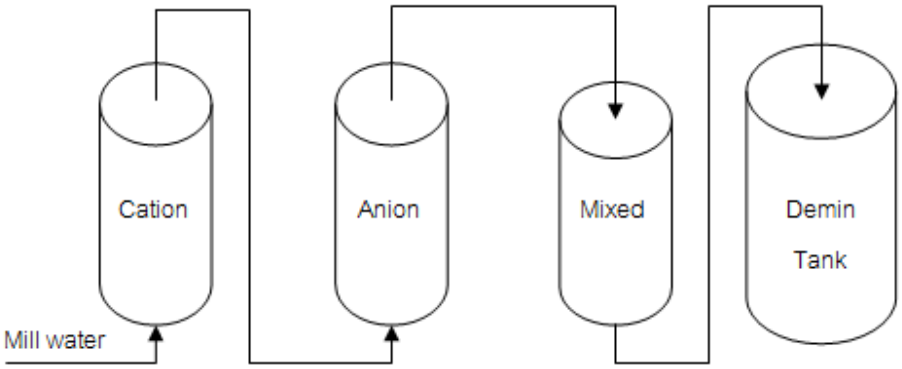
$$OH^- OH^- + H_2SO_4 \longrightarrow SO_4^{2-} + 2H_2O$$

$$OH^- + HCl \longrightarrow Cl^- + H_2O$$

Mixed bed exchanger จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการ demineralized water โดยรับน้ำที่ออกจาก Anion exchanger tank ไหลเข้าสู่ mixed bed exchange tank ในลักษณะ down flow ภายในถังจะบรรจุ เรซิน 2 ชนิด คือทั้ง cation resin ซึ่งเป็น strong acidic cation ชนิด Amberjet 1200 H และ anion resin ซึ่งเป็น strong basic anion ชนิด Amberjet 4200 Cl หน้าที่ของ mixed bed exchanger คือทำการแลกเปลี่ยนทั้งประจุบวก และประจุลบ ที่หลงเหลือจาก cation exchanger และ anion exchanger

น้ำที่ผ่านออกจาก mixed bed exchanger แล้วเรียกว่า “Demineralized water” จะถูกส่งไปเก็บที่ Demin water tank เพื่อใช้เป็นน้ำในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกระบวนการ

แลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อกำเนิดไอน้ำแบบการนำสารเคมีกลับคืน (Recovery boiler) ต่อไป ทิศทางการไหลของน้ำในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออนดังแสดงในรูปที่ 2.8 (Lindfors 1997)



รูปที่ 2.8 ทิศทางการไหลของน้ำในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน

ไอออนอิสระในเรซินจะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นๆ ในน้ำดิบให้ได้น้ำสะอาดตามต้องการ ขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดเมื่อมีไอออนอิสระในเรซินเหลือน้อย จนกระทั่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนต่างๆ ในน้ำดิบได้ ทำให้น้ำที่ได้มีไอออนที่ไม่ต้องการในปริมาณเข้มข้นกว่าระดับที่ยอมรับได้ อายุในแต่ละวัฏจักรของเรซินขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนในน้ำดิบ และขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

การล้างย้อน (Backwash)

หลังจากเรซินหมดอำนาจแล้ว (แต่ยังไม่เสีย) ต้องทำการล้างย้อน เพื่อให้ชั้นเรซินมีการขยายตัวเกิดขึ้น เพื่อวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ทำลายการจับตัวเป็นก้อนของเรซิน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน
2. เพื่อล้างความขุ่น หรือตะกอนแขวนลอยที่ติดอยู่ในชั้นเรซิน
3. ทำให้มีการเรียงชั้นใหม่ของเรซิน ซึ่งช่วยให้การกระจายน้ำของเรซินได้อย่างสม่ำเสมอในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน

อัตราการไหลในการล้างย้อนขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน อุณหภูมิของน้ำ และระดับการขยายตัวของชั้นเรซิน โดยปกติอัตราการไหลในการล้างย้อนของชั้นเรซินแบบกรดและด่าง มักใช้เวลาประมาณ 5-15 นาที การล้างย้อนจะทำให้ชั้นเรซินแบบกรดและแบบด่างขยายตัวประมาณ 50-75 % และ 70-75% ตามลำดับ

การฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regeneration)

เป็นการทำให้เรซินที่หมดอำนาจไปแล้วกลับฟื้นตัวขึ้นมามีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนใหม่อีก การที่เรซินหมดอำนาจ (ชั่วคราว) เป็นเพราะว่าไอออนอิสระส่วนใหญ่ในเรซินถูกนำไปแลกกับไอออนอื่นในน้ำจนหมดสิ้น การทำรีเจนเนอเรชันคือการขับไล่ไอออนในเรซินที่แลกมากับน้ำ และเติมไอออนอิสระให้กับเรซินที่เสื่อมอำนาจไปแล้ว เรียกว่า รีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ตัวอย่างสารรีเจนเนอแรนต์ ได้แก่ NaOH ซึ่งใช้เติม OH^- ให้กับเรซิน หรือ H_2SO_4 ซึ่งใช้เติม H^+ ให้กับเรซิน เป็นต้น

ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration Efficiency) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างจำนวนสมมูลของไอออนในเรซินที่เสื่อมสภาพแล้ว และจำนวนสมมูลของไอออนในสารรีเจนเนอแรนต์ที่นำมาแลกเปลี่ยน ถ้าประสิทธิภาพเท่ากับ 100% หมายความว่า ไอออนที่แลกเปลี่ยนระหว่างกันของสารรีเจนเนอแรนต์ กับของเรซินที่เสื่อมอำนาจแล้วมีจำนวนเท่ากัน แต่โดยปกติแล้วการแลกเปลี่ยนไอออนจากเรซินที่เสื่อมอำนาจแล้ว มักต้องใช้ไอออนจำนวนมากกว่าสารรีเจนเนอแรนต์ กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันมักไม่ถึง 100% ในทางปฏิบัติ นิยมทำการรีเจนเนอเรชันเพื่อเรียกอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินให้กลับคืนมาบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันของเรซินมักมีค่าต่ำ ทำให้การเรียกอำนาจที่มีอยู่ทั้งหมดที่มีอยู่กลับคือมาต้องสิ้นเปลืองสารรีเจนเนอแรนต์อย่างมาก และไม่คุ้มกับผลตอบแทนที่ได้รับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>กระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน</u>

กระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน มีขั้นตอนดังนี้

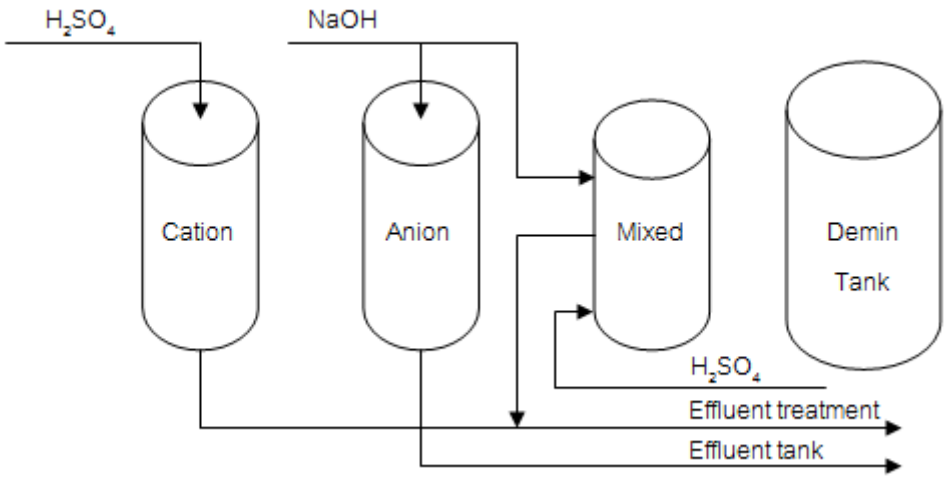
1. Cation exchanger ใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 98% เจือจางด้วยน้ำอ่อนให้เหลือความเข้มข้นประมาณ 0.8-1.6% ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะเป็นลักษณะ down flow สารเคมีน้ำหลังจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน แล้วจะปล่อยลงสู่หน่วยบำบัดน้ำเสีย (Effluent treatment) ต่อไป

$$Ca^{2+} + H_2SO_4 \longrightarrow 2H^+ + CaSO_4$$

2. Anion exchanger ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 50% เจือจางด้วยน้ำอ่อนให้เหลือความเข้มข้นประมาณ 2.3% ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะเป็น down flow สารเคมีที่ใช้ฟื้นฟูสภาพเรซินแล้วจะเก็บใน Effuent tank

$$Cl^- + NaOH \longrightarrow OH^- + NaCl$$

3. Mixed bed exchanger มีขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซินหลายขั้นตอนแตกต่างไปจาก Cation และ Anion exchanger เพราะมีเรซิน 2 ชนิดปนกัน ดังนั้นก่อนการฟื้นฟูสภาพเรซินจึงต้องมีขั้นตอนการแยกเรซินออกจากกันและสารเคมีที่ใช้ คือกรดซัลฟูริกในการฟื้นฟู cation resin ลักษณะการไหลเป็นแบบ down flow และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการฟื้นฟู anion resin ลักษณะการไหลเป็นแบบ up flow สารเคมีที่ใช้ฟื้นฟูสภาพเรซินแล้วจะปล่อยลงสู่หน่วยบำบัดน้ำเสีย ทิศทางการไหลของน้ำในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออนดังแสดงในรูปที่ 2.9 (Lindfors 1997)



รูปที่ 2.9 ทิศทางการไหลของสารเคมีในการฟื้นฟูสภาพเรซิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การชะล้างสารเคมี (Rinse)

หลังจากผ่านขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซินเรียบร้อยแล้ว มีสารรีเจนเนอแรนต์กรดและด่างตกค้างอยู่ในชั้นเรซิน การชะล้างสารเคมีมีจุดประสงค์เพื่อขับไล่หรือแทนที่สารรีเจนเนอแรนต์ให้หลุดออกจากชั้นเรซิน การชะล้างเรซินมี 3 ขั้นตอน คือการชะล้างอย่างช้า (Slow Rinse หรือ Displacement Rinse) การชะล้างอย่างเร็ว (Fast Rinse) และการชะล้างโดยวนน้ำในระบบ (Recirculation Rinse)

การชะล้างอย่างช้าจะทำก่อนโดยปล่อยให้น้ำประมาณ 1 เท่าของปริมาตรของชั้นเรซิน (Bed Volumm) ไหลผ่านเรซินในอัตราเดียวกับการทำรีเจนเนอเรชัน น้ำล้างในขั้นตอนนี้เป็นน้ำเสีย เพราะมีสารละลายรีเจนเนอแรนต์ที่ใช้แล้วปนอยู่มาก การชะล้างอย่างรวดเร็วมีจุดประสงค์เพื่อขับไล่สารรีเจนเนอแรนต์ที่ยังตกค้างอยู่ให้หลุดออกจากชั้นเรซินให้หมด จากนั้นจะมีสารรีเจนเนอแรนต์ตกค้างอยู่

น้อย จึงอาจชะล้างให้เร็วขึ้นได้ อัตราเร็วของการชะล้างอย่างเร็วมักเป็นอัตราเดียวกับอัตราการไหลของการแลกเปลี่ยนไอออน และขั้นสุดท้ายคือการชะล้างโดยวนน้ำในระบบจนกว่าคุณภาพน้ำจะผ่านเกณฑ์คุณภาพที่ยอมรับได้จึงเริ่มระบบการแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เจนจิวัฒนกุล 2554 จากการศึกษาเรื่องการลดของเสียในกระบวนการพิมพ์พลาสติกโดยแนวทางซิกซ์ ซิกมา นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการลดของเสียจากกระบวนการพิมพ์พลาสติก โดยใช้หลักทางสถิติและทำตามขั้นตอน DMAIC ของแนวคิดซิกซ์ ซิกมา ใช้เครื่องมือคุณภาพการวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลา คัดกรองปัจจัยต่างๆด้วยตารางแสดงเหตุและผล จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMEA ปรับปรุงแก้ไขกระบวนการโดยใช้วิธีการออกแบบแฟคทอเรียล ทำการทดลอง 2 ซ้ำให้ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย และสร้างแนวทางในการควบคุมให้ปริมาณของเสียหลังการปรับปรุงอยู่ในระดับต่ำ พบว่าหลังการปรับปรุงกระบวนการมีสัดส่วนของเสียลดลง 86.90%

หงสพันธ์ 2553 จากการศึกษาเรื่องการลดข้อบกพร่องในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถยนต์โดยแนวทางซิกซ์ ซิกมา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากงานซ่อมข้อบกพร่องหลักและจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อรถ 1 คัน โดยใช้แนวทางการปรับปรุงของซิกซ์ ซิกมา ใช้เครื่องมือทางคุณภาพวิเคราะห์ระบบการวัดสำหรับข้อมูลเชิงนับ วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ ระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อปัญหา ใช้แผนภาพและตารางแสดงความสัมพันธ์เหตุและผล การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยการออกแบบการทดลองและกำหนดแผนควบคุมและมาตรฐานวิธีการปฏิบัติงานใหม่ หลังการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อคันลงได้ 57% และลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากงานซ่อมข้อบกพร่องต่อคันลงได้ 55%

ปานอำไพ 2553 จากการศึกษาเรื่องการลดของเสียผลิตภัณฑ์คอยล์เย็นในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยการประยุกต์ใช้แนวทางของซิกซ์ ซิกมา (DMAIC) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แนวทางในการดำเนินงานของซิกซ์ ซิกมา 5 ขั้นตอน (DMAIC) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตคอยล์เย็นในอุตสาหกรรมยานยนต์ นำเครื่องมือคุณภาพได้แก่การระดมสมอง แผนภูมิก้างปลา FMEA และเอกสารควบคุมการผลิต เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพสูงสุด พบว่าสามารถลดอัตราการเกิดของเสียงานคอยล์เย็นลงได้ 50.46% และลดจำนวนของเสียโดยเฉลี่ยของชิ้นส่วน Core plate ส่งผลให้มูลค่าของเสียในกระบวนการผลิตคอยล์เย็นลดลง 63.16%

พัทธิกุล 2552 จากการศึกษาเรื่องการลดของคืนจากการส่งมอบฐานรองรองมอเตอร์โดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาด้านคุณภาพเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการประกอบฐานรองรับมอเตอร์ซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนหัวอ่านฮาร์ดดิสค์ไดร์ฟอันเนื่องมาจากข้อบกพร่องประเภท Open circuit และ Hi pot โดยใช้หลักการคุณภาพเชิงสถิติ ใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมาเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการ โดยใช้เครื่องมือคุณภาพวิเคราะห์ระบบการวัด วิเคราะห์สาเหตุต่างๆของปัญหาโดยแผนผังแสดงเหตุและผล ลำดับความรุนแรงของปัญหาด้วยวิธี FMEA ทดสอบสมมติฐานเชิงสถิติเพื่อหาสาเหตุที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ปรับปรุงกระบวนการโดยการออกแบบการทดลอง ทดสอบผลและจัดทำเป็นมาตรฐาน พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียได้ 78%

ทองศรีพงษ์ 2550 จากการศึกษาเรื่องการลดของเสียในกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาโดยใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการควบคุมคุณภาพโดยใช้ซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตา โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการซิกซ์ ซิกมา ในการปรับปรุงกระบวนการ 5 ขั้นตอน มีการศึกษาความแม่นยำและความถูกต้องของระบบการวัด จากนั้นวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยการระดมสมองและแผนภูมิก้างปลา จากนั้นลำดับความสำคัญของสาเหตุโดยใช้ตารางความสัมพันธ์แสดงเหตุและผลและการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ ปรับปรุงกระบวนการโดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการผลิต และจัดทำมาตรการควบคุมและป้องกันปัญหา พบว่าสามารถลดสัดส่วนเลนส์เสียในกระบวนการขึ้นรูปเลนส์ได้ 30.83% และลดสัดส่วนเลนส์เสียในกระบวนการเคลือบเลนส์ลงได้ 44.23%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

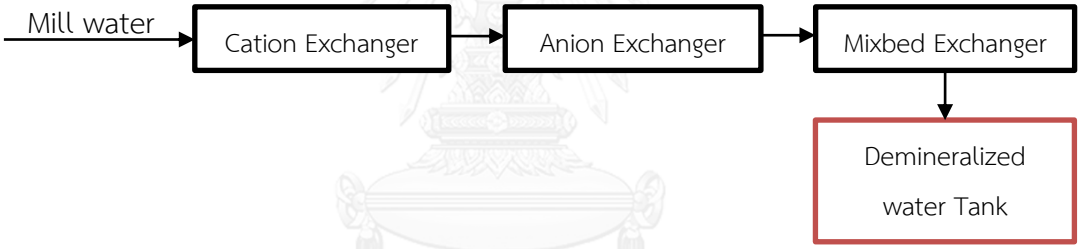
บทที่ 3
ระยะนิยามปัญหา (Define Phase)

3.1 บทนำ

ระยะนิยามปัญหา (Define Phase) เป็นขั้นตอนเริ่มต้นของแนวคิดซิกซ์ ซิกมา เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ในขั้นตอนนี้จะประกอบไปด้วย การศึกษากระบวนการผลิต การกำหนดปัญหา กำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัด

3.2 ศึกษากระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ เป็นกระบวนการผลิตน้ำจากน้ำประปา (Mill water) โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน โดยเรซินที่ใช้มี 2 ชนิดคือไอออนบวกและไอออนลบ โดยกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุมีผังการผลิตดังนี้



รูปที่ 3.1 ผังกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

Cation Exchanger ประกอบด้วยเรซินชนิดกรดแก่ (Strong acidic cationic resin, SAR) ชนิด Amberjet 1200 Na มีปริมาตรเรซิน 3.0 ลูกบาศก์เมตร ทำหน้าที่กำจัดไอออนบวกในน้ำ ได้แก่ แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และโซเดียมไอออน (Na^{+}) เป็นต้น

รูปที่ 3.2 ถังแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (Cation Exchanger)

Anion Exchanger ประกอบด้วยเรซินชนิดด่างอ่อน (Weak basic anionic resin, WBR) ชนิด Amberlite IRA 96 RF มีปริมาตรเรซิน 1.6 ลูกบาศก์เมตร ทำหน้าที่กำจัดไอออนลบของกรดแก่ในน้ำได้แก่ ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) คลอไรด์ไอออน(Cl^-) และไนเตรตไอออน(NO_3^-) เป็นต้น และประกอบด้วยเรซินชนิดด่างแก่ (Strong basic anionic resin, SBR) ชนิด Amberjet 4200 Cl มีปริมาตรเรซิน 1.7 ลูกบาศก์เมตร ทำหน้าที่กำจัดไอออนลบในน้ำ ได้แก่ ได้แก่ ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ไฮโดรเจนคาร์บอเนต (HCO_3^-) ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) และคลอไรด์ไอออน(Cl^-) เป็นต้น

รูปที่ 3.3 ถังแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ (Anion Exchanger)

Mixbed Exchanger ประกอบด้วยเรซินชนิดกรดแก่ (Strong acidic cationic resin, SAR) ชนิด Amberjet 1200H มีปริมาตรเรซิน 0.65 ลูกบาศก์เมตร และเรซินชนิดด่างแก่ (Strong basic anionic resin, SBR) ชนิด Amberjet 4200Cl มีปริมาตรเรซิน 0.65 ลูกบาศก์เมตร ทำหน้าที่กำจัดไอออนบวกและไอออนลบที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.4 ถังแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกและลบ (Mixed bed Exchanger)

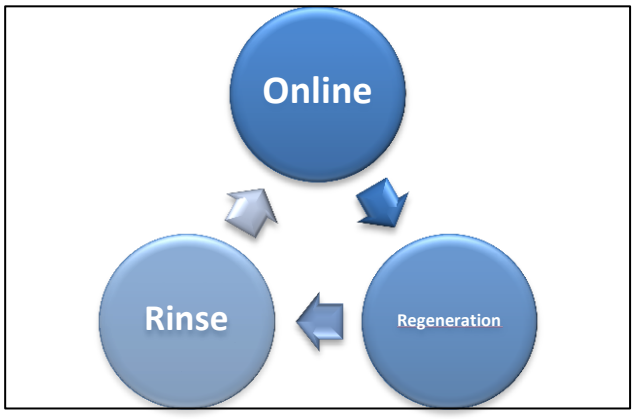
น้ำที่ผลิตได้จากถังแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกและลบ (Mixbed Exchanger) คือน้ำปราศจากแร่ธาตุจะถูกนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water Tank) ก่อนจ่ายไปยังถังเก็บน้ำในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า (Boiler feed water tank) และจ่ายไปเจือจางกรดและด่างในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซิน

รูปที่ 3.5 ถังเก็บน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water Tank)

ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนมีการทำงาน 4 ขั้นตอนต่อเนื่องกันดังนี้

1. การแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online)
2. การล้างย้อน (Backwash)
3. การฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regeneration)
4. การชะล้าง (Rinse)

เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 การล้างย้อน มีขั้นตอนในการดำเนินงานมากและใช้ระยะเวลานาน จึงมีความถี่ในการล้างย้อนปีละ 1-2 ครั้ง ดังนั้นในระบบการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุมีระบบที่ต่อเนื่องกันเป็นวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ต่อเนื่องกัน

ระบบการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ เริ่มจากขั้นตอนแลกเปลี่ยนไอออน (Online) เพื่อผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุสามารถผลิตได้ 500 ลูกบาศก์เมตร จากนั้นทำการฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regeneration) เพื่อให้เรซินกลับมามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้งด้วยสารรีเจนเนอแรนต์ และขั้นตอนสุดท้ายชะล้างสารรีเจนเนอแรนต์ออกจากเรซิน (Rinse) โดยจะมีขั้นตอนล้างอย่างช้า ล้างอย่างเร็ว และหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินจนกระทั่งคุณภาพน้ำที่ออกจากถัง Anion มีคุณภาพผ่านเกณฑ์ที่กำหนดดังตารางที่ 3.1 และคุณภาพน้ำออกจากถัง Mixbed มีคุณภาพผ่านเกณฑ์ที่กำหนดดังตารางที่ 3.2 จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนแลกเปลี่ยนไอออนผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุอีกครั้ง

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์กำหนดคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ออกจากถัง Anion

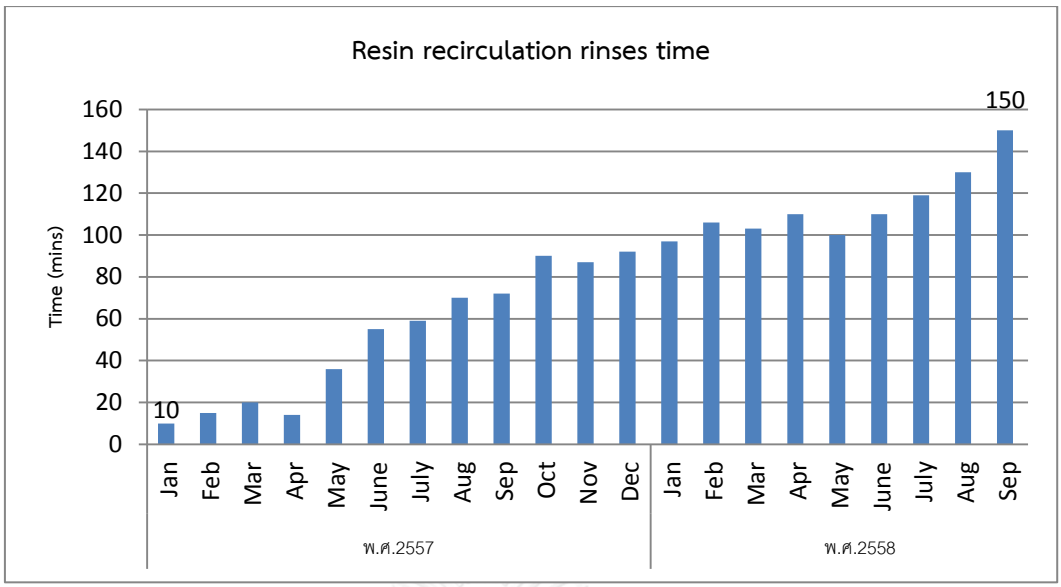
Parameter	หน่วย	ค่าที่ยอมรับได้
pH	-	> 8.0
Conductivity	μS/cm	< 2.0
Silica (SiO_2)	ppb	< 20.0

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์คุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ออกจากถัง Mix bed

Parameter	หน่วย	ค่าที่ยอมรับได้
pH	-	6.5 – 7.5
Conductivity	μS/cm	< 1.0
Silica (SiO_2)	ppb	< 20.0

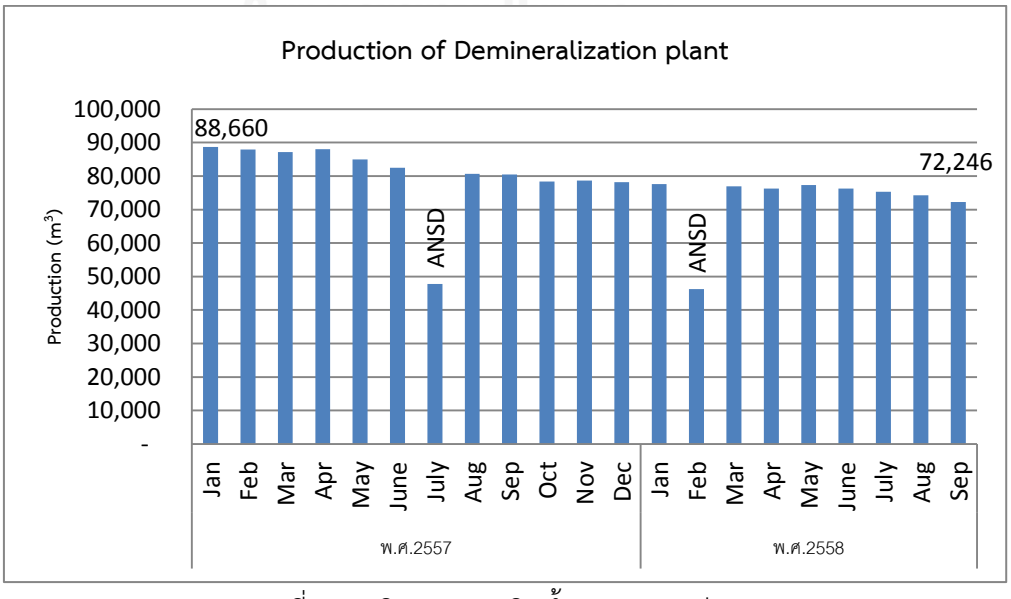
3.3 การกำหนดปัญหา

ในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ พบปัญหาคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินมีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำที่ออกจากถัง Anion สูงเกิน 2.0 μS/cm เมื่อคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุไม่ผ่านเกณฑ์ ต้องหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (Recirculation Rinse) ในระบบจนกว่าน้ำปราศจากแร่ธาตุจะมีคุณภาพดีผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงจะเริ่มระบบการแลกเปลี่ยนไอออน (Service/Online) ทำให้ปัจจุบันใช้ระยะเวลาในการ Recirculation Rinse นานมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7



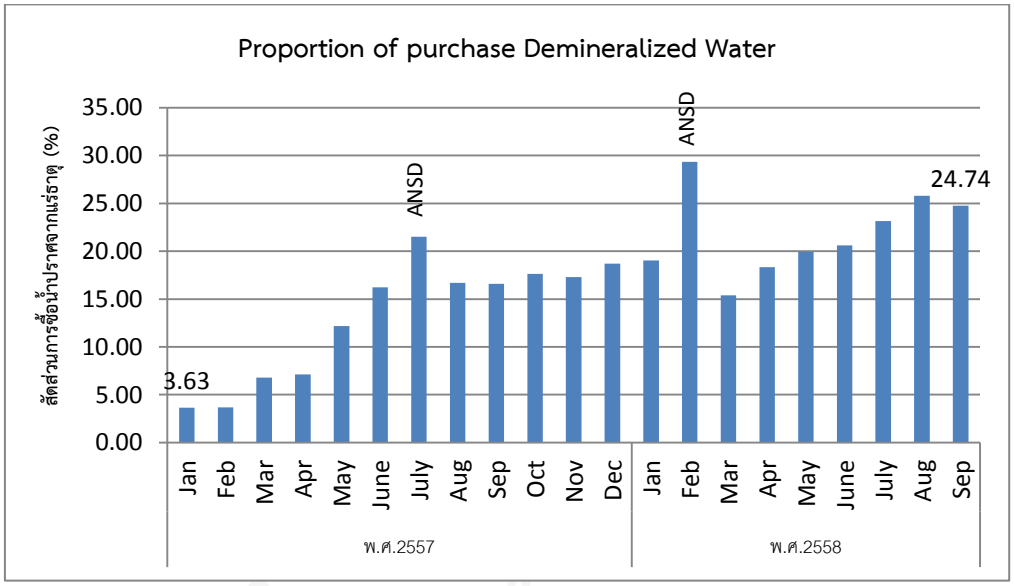
รูปที่ 3.7 ระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จากกราฟรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเพิ่มสูงขึ้น ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 และเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน จากเดิมใช้ระยะเวลา 10 นาที ปัจจุบันใช้ระยะเวลา 150 นาที ทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ ส่งผลให้ผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้น้อยลงดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งกำลังการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุสามารถผลิตได้ 31 ลิตรต่อวินาที สามารถผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ 500 ลูกบาศก์เมตรต่อการฟื้นฟูสภาพเรซิน 1 ครั้ง มีกำลังการผลิตสูงสุดที่ 3,500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือประมาณ 105,000 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน



รูปที่ 3.8 ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จากกราฟรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าข้อมูลปี 2557 ในเดือนมกราคมผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ 88,600 ลูกบาศก์เมตร และมีแนวโน้มผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ลดลงอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันในเดือนกันยายน 2558 ผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ 72,246 ลูกบาศก์เมตร จะเห็นได้ว่าผลิตน้ำได้ลดลงน้อยลงจากเดือนมกราคมปี 2557 ถึง 16,354 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็น 18.5% (ในเดือนกรกฎาคม 2557 และเดือนกุมภาพันธ์ 2558 มีการหยุดซ่อมบำรุงประจำปี (Annual Shut Down; ANSD) ทำให้มีผลผลิตน้อยกว่าเดือนอื่น) จากการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ลดน้อยลงทำให้เกิดปัญหาน้ำปราศจากแร่ธาตุไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ผลิตไอน้ำ โรงงานจึงซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุนี้จากภายนอก ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น ดังแสดงได้ในกราฟรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 สัดส่วนการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุต่อปริมาณการใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุทั้งหมด

เนื่องจากปัญหาการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ไม่เพียงพอ จากกราฟรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 และเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน สอดคล้องกับปัญหาในกระบวนการผลิตที่ต้องใช้ระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินมากขึ้น ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากปัญหานี้จึงทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุคิดเป็นสัดส่วน 25% ของปริมาณการใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุทั้งหมด คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 2 ล้านบาทต่อเดือน

3.4 การกำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัด

ปัญหาที่จะดำเนินการแก้ไขคือ ลดเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ โดยตัวชี้วัดที่ใช้คือระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในหน่วยนาที

3.5 การจัดตั้งคณะทำงาน

ผู้วิจัยทำการกำหนดทีมงานในการดำเนินงานจากผู้ที่มีประสบการณ์ มีความรู้ ความชำนาญในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ โดยเฉพาะการปรับปรุงคุณภาพของน้ำปราศจากแร่ธาตุ เพื่อช่วยในการระดมสมองด้วยเครื่องมือและเทคนิคต่างๆที่ใช้ส่งผลต่อคุณภาพของน้ำปราศจากแร่ธาตุที่มีค่าการนำไฟฟ้า อีกทั้งยังช่วยในการสนับสนุนการทดลองต่างๆเพื่อให้บรรลุเป้าหมายการทดลอง โดยทีมงานวิจัยประกอบไปด้วยบุคคลที่มาจากส่วนงานต่างๆดังนี้แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 บุคลากรในทีมวิจัยที่มาจากส่วนงานต่างๆ

ตำแหน่ง	การศึกษา	ประสบการณ์
ผู้จัดการฝ่ายผลิต	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น	ผู้จัดการหน่วยงานผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุโรงงานกรณีศึกษา 15 ปี
วิศวกรฝ่ายผลิต	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล	วิศวกรควบคุมกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ ประสบการณ์ 8 ปี
พนักงานฝ่ายผลิต	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์ สาขาเคมี เทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าพระนครเหนือ	พนักงานควบคุมระบบปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติ (Distributed Control System; DCS) ในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุประสบการณ์ 5 ปี
ผู้จัดการฝ่ายคุณภาพ	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์ สาขาเคมี	ผู้จัดการหน่วยงานควบคุมคุณภาพน้ำในกระบวนการผลิต ประสบการณ์ 12 ปี
พนักงานฝ่ายคุณภาพ	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์ สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	พนักงานทดสอบน้ำในกระบวนการผลิตห้องปฏิบัติการ ประสบการณ์ 5 ปี

3.6 สรุประยะนิยามปัญหา

ในขั้นตอนนิยามปัญหาหลังจากที่ศึกษากระบวนการผลิตและปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาแล้ว ได้กำหนดปัญหาและขอบเขตในงานวิจัยคือปัจจุบันพบปัญหาคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินมีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำที่ออกจากถัง Anion สูงเกิน 2.0 μS/cm ทำให้ใช้เวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเป็นระยะเวลานานมากขึ้น โดยจากข้อมูลระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินตั้งแต่เดือนมกราคม 2557 ถึงเดือนกันยายน 2558 พบว่าใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 10 นาที ปัจจุบันใช้เวลา 150 นาที ส่งผลให้ผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้น้อยลง ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ในระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำ จึงมีค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุมากขึ้นมากกว่า 2 ล้านบาทต่อเดือน ดังนั้นจุดประสงค์ในงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาปัญหาที่เกี่ยวกับคุณภาพของน้ำที่ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเพื่อลดระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ระยะตรวจวัดปัญหา (Measure Phase)

4.1 บทนำ

จากที่ได้นิยามปัญหาแล้ว ในบทนี้จะเป็นการวัดเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยใช้เครื่องมือทางคุณภาพและสถิติช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นไปได้ เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดในการตรวจวัดระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินและคุณภาพของน้ำปราศจากแร่ธาตุ ได้แก่ค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำปราศจากแร่ธาตุในขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่ออกจากถัง Anion เพื่อให้แน่ใจว่าการตรวจวัดในระบบนั้นมีความถูกต้องแม่นยำ จากนั้นจะทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อระดมสมอง วิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลให้น้ำปราศจากแร่ธาตุที่ออกจากถัง Anion มีค่าการนำไฟฟ้าไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพที่กำหนด ด้วยเครื่องมือและเทคนิคต่างๆ ได้แก่ผังสาเหตุและผล (Cause and effect diagram) จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลโดยการให้คะแนนเพื่อเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัย (Cause and effect matrix) และคัดกรองปัจจัยด้วย FMEA เพื่อให้ได้ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุในกระบวนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน

4.2 การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัด

การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการแก้ไขปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ต้องมีความมั่นใจว่าระบบการวัดมีความถูกต้อง มีเสถียรภาพที่ดี ด้วยการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ โดยการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัด ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งระบบการวัดเป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต ได้แก่ ระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (Recirculate rinse time) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าออนไลน์ (Conductivity online) และเครื่องมือวัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เครื่องมือวัดค่า pH (pH meter) และเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
2. การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดของคุณภาพน้ำโดยห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ค่าซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2)

เนื่องจากระบบการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุใช้ระบบปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติ (Distributed Control System ; DCS) โดยสามารถควบคุมกระบวนการผลิตต่างๆได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์และเชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดและควบคุมให้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆทำงานตามขั้นตอนการทำงาน ในงานวิจัยนี้มีตัวชี้วัดงานวิจัยคือระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ซึ่งคิดจากระยะเวลาที่เริ่มนำน้ำจากถัง Mixbed เข้าถัง Cation จนกระทั่งค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ Anion น้อยกว่า 2.0 μS/cm และน้ำ Mixed bed น้อยกว่า 1.0 μS/cm (วัดค่าการนำไฟฟ้าจากเครื่องมือวัดออนไลน์) ซึ่งระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้ข้อมูลจากเวลาที่หน้าจอระบบปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติ (DCS) เริ่มกระบวนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินจนจบกระบวนการ โดยมีการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือนับระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (Recirculate rinse time) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าออนไลน์ (Conductivity online) และเครื่องมือวัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เครื่องมือวัดค่า pH (pH meter) และเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดตามระบบ ISO 9001 ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาได้รับการรับรองระบบคุณภาพจากหน่วยงานภายนอก (Third party) ดังนั้นการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงระบบการวัดของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตและเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการจึงมีความน่าเชื่อถือ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) โดยห้องปฏิบัติการ มีวิธีการปฏิบัติงานเขียนเป็นขั้นตอนการทำงาน (Work Instruction) แต่อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้จากเครื่องมือวัดและพนักงาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจในระบบการวัด จึงทำการวิเคราะห์ถึงความแม่นยำของเครื่องมือวัดซึ่งเป็นการวิเคราะห์ถึงความผันแปรของระบบการวัด 2 ด้าน ดังนี้

1. Repeatability หมายถึงความผันแปรของค่าวัดที่ถูกวัดโดยพนักงานวัดคนเดียวกัน โดยเครื่องมือวัดเดียวกัน ในการวัดชิ้นงานเดียวกันซ้ำๆ โดยทั่วไปมักจะแสดงถึงความผันแปรของเครื่องมือวัด
2. Reproducibility หมายถึงความผันแปรที่แสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้เครื่องมือวัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปมักแสดงถึงความแตกต่างของค่าวัดระหว่างพนักงานวัดต่างคนกัน

ในการกำหนดขนาดตัวอย่างและจำนวนครั้งของการวัดซ้ำ มีคำแนะนำในการกำหนดขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความเที่ยงของระบบการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อประเมินระบบการวัด

จำนวนผู้ทดสอบ (พนักงานวัด)	จำนวนอุปกรณ์วัด	จำนวนชิ้นงานที่น้อยที่สุด	จำนวนการวัดซ้ำในแต่ละชิ้นงาน
1	1	10	5
1	2	15	3
2	1	15	3
2	2	10	2
1 หรือ 2	3 หรือมากกว่า	10	2
3 หรือมากกว่า	1 หรือ 2	10	2
3 หรือมากกว่า	3 หรือมากกว่า	10	2

4.2.1 การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์

ในการทดสอบของงานวิจัยนี้ กำหนดจำนวนผู้ทดสอบ 3 คน จำนวนอุปกรณ์วัดคือเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) 1 เครื่อง ดังนั้นจึงต้องมีจำนวนตัวอย่างการวัดค่าซิลิกาได้ออกไซด์มากกว่าหรือเท่ากับ 10 ตัวอย่าง และจำนวนการวัดซ้ำในแต่ละตัวอย่างเท่ากับ 2 ครั้ง โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ในน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุดังนี้

1. คัดเลือกผู้ทดสอบที่มีความชำนาญในการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ในน้ำและชำนาญการใช้เครื่องมือวัดการดูดกลืนแสงจำนวน 3 คน
2. เตรียมตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ค่าซิลิกาไดออกไซด์ จำนวน 10 ตัวอย่าง ซึ่งเตรียมจากสารละลายมาตรฐานซิลิกาไดออกไซด์เพื่อทราบค่าที่แน่นอนในการวิเคราะห์ ในช่วงความเข้มข้น 0-30 ppb
3. ให้พนักงานทำการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ โดยแต่ละคนจะทำการวัดทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 ครั้ง
4. มีลำดับในการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์อย่างสุ่ม เพื่อหลีกเลี่ยงความเอนเอียงขณะทำการประเมินระบบการวัด และเมื่อผู้วัดทำการวัดค่าเรียบร้อยแล้วจะแจ้งผลการทดสอบที่วัดได้

ผ่านคนกลาง ซึ่งทำหน้าที่ในการลงผลการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ให้ ซึ่งจะช่วยลดความเอนเอียงระหว่างผู้วัดแต่ละคนได้

5. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความผันแปรของระบบการวัด

จากการดำเนินการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ในน้ำ (หน่วย part per billion; ppb)

ตัวอย่าง	ผู้ทดสอบคนที่ 1		ผู้ทดสอบคนที่ 2		ผู้ทดสอบคนที่ 3	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	4.55	5.12	4.55	4.55	5.12	4.55
2	18.21	18.71	17.64	18.21	18.21	18.21
3	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.26
4	17.07	17.07	17.07	17.64	17.07	17.64
5	10.81	11.38	10.81	10.81	10.81	10.81
6	25.61	25.04	25.04	24.47	24.47	25.04
7	12.52	12.52	13.66	13.09	13.09	13.09
8	3.41	3.98	3.41	3.41	3.41	4.55
9	19.35	19.42	19.92	19.92	19.92	19.35
10	27.89	28.46	27.89	27.89	27.32	28.46

การวิเคราะห์และสรุปผลระบบการวัดมีดังนี้

1. จากกราฟ Components of Variation ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าความแปรปรวนอันเนื่องมาจากความแตกต่างของตัวอย่าง (Part-To Part) เท่ากับ 99.81% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความแปรปรวนจากระบบการวัด (Total Gage R&R) เท่ากับ 0.19% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความผันแปรส่วนใหญ่ของระบบการวัดนี้มาจากความแตกต่างของตัวอย่างน้ำ
2. จากแผนภูมิควบคุมพิสัย (R Chart by Operator) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าพนักงานทุกคน มีพิสัยอยู่ในการควบคุม แสดงว่า ค่าที่วัดซ้ำได้ของแต่ละคนแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน

3. จากแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย (Xbar Chart by Operator) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าค่าเฉลี่ยเกือบทุกจุดออกนอกช่วงการควบคุมทั้งด้านขอบบน (UCL) และขอบล่าง (LCL) แสดงว่าความผันแปรจากสาเหตุของระบบการวัดนี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความผันแปรจากตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน
4. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

   การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Analysis) เพื่อพิจารณาถึงสาเหตุของความแปรปรวน มีปัจจัยจากลักษณะตัวอย่าง พนักงานวัด และอิทธิพลร่วมระหว่างตัวอย่างและพนักงานวัด มีผลต่อค่าซิลิกาไดออกไซด์ที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยทำการทดสอบสมมติฐานดังนี้
5. ลักษณะตัวอย่าง (Sample)

   H_0 : ลักษณะตัวอย่างไม่มีอิทธิผลต่อความแปรปรวน

   H_1 : ลักษณะตัวอย่างมีอิทธิผลต่อความแปรปรวน

สรุป ค่า P-Value ของลักษณะตัวอย่าง < 0.0005 ซึ่งน้อยกว่า α =0.05 จะปฏิเสธ H_0 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงว่าลักษณะตัวอย่างมีอิทธิผลต่อความแปรปรวนของระบบการวัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6. พนักงานวัด (Operator)

   H_0 : พนักงานวัดไม่มีอิทธิผลต่อความแปรปรวน

   H_1 : พนักงานวัดมีอิทธิผลต่อความแปรปรวน

สรุป ค่า P-Value ของพนักงานวัด เท่ากับ 0.894 ซึ่งมากกว่า α =0.05 จะยอมรับ H_0 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงว่าพนักงานวัดไม่มีอิทธิผลต่อความแปรปรวนของระบบการวัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

7. อิทธิพลร่วมระหว่างลักษณะตัวอย่างกับพนักงานวัด (Sample*Operator)

   H_0 : อิทธิพลร่วมระหว่างลักษณะตัวอย่างกับพนักงานวัดไม่มีอิทธิผลต่อความแปรปรวน

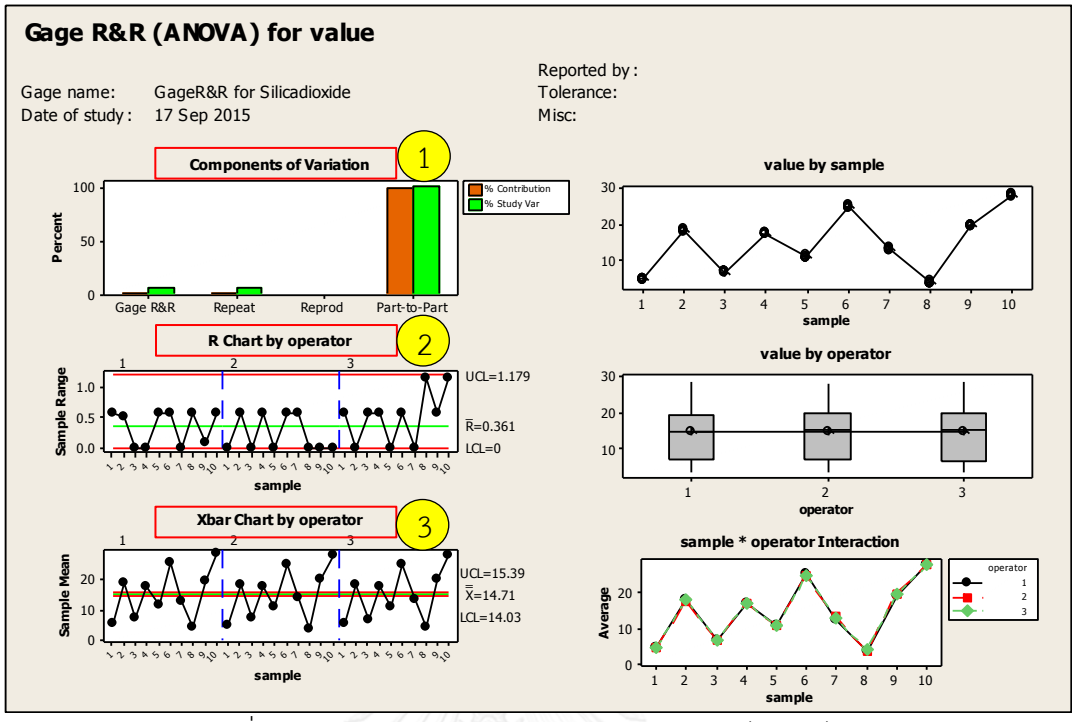
   H_1 : อิทธิพลร่วมระหว่างลักษณะตัวอย่างกับพนักงานวัดมีอิทธิผลต่อความแปรปรวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สรุป ค่า P-Value ของพนักงานวัด เท่ากับ 0.342 ซึ่งมากกว่า α =0.05 จะยอมรับ H_0 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างลักษณะตัวอย่างกับพนักงานวัดไม่มีอิทธิผลต่อความแปรปรวนของระบบการวัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

8. องค์ประกอบความแปรปรวน เมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นค่าร้อยละ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า ถ้าความแปรปรวนทั้งหมดคือ 100 จะเป็นความแปรปรวนจากลักษณะตัวอย่าง 99.81 และความแปรปรวนจากระบบการวัด 0.19 ซึ่งความแปรปรวนนี้เป็นความแปรปรวนจากสาเหตุรีพีททะบิลิตี้ คือความผันแปรจากเครื่องมือวัด
9. ความผันแปรจากระบบการวัดเทียบกับความผันแปรจากลักษณะตัวอย่าง (%SV หรือ P/TV) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 คิดเป็น 4.34% ซึ่งน้อยกว่า 10% อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามการอ้างอิง AIAG ตามตารางที่ 4.3 จึงสรุปว่าระบบการวัดนี้มีความแม่นยำและความผันแปรอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
10. ระบบการวัดจะมีความสามารถในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ ค่า Number of Distinct Categories (ndc) เท่ากับ 32 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยที่ ndc หมายถึง ตัวเลขที่แสดงประเภทของข้อมูลที่แตกต่างกัน ระบบการวัดที่ศึกษามีคุณสมบัติแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 32 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากระบบการวัดสามารถใช้ประมาณค่าความผันแปรของกระบวนการวัดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบระบบการวัดของค่าซิลิกาไดออกไซด์

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for value

Gage name: GageR&R for Silicadioxide
Date of study: 17 Sep 2015
Reported by:
Tolerance:
Misc:

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P	
sample	9	3754.64	417.182	2889.88	0.000	5
operator	2	0.03	0.016	0.11	0.894	6
sample * operator	18	2.60	0.144	1.17	0.342	7
Repeatability	30	3.70	0.123			
Total	59	3760.97				

Alpha to remove interaction term = 0.25

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบระบบการวัดของค่าซิลิกาไดออกไซด์ (2)

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
sample	9	3754.64	417.182	3178.62	0.000
operator	2	0.03	0.016	0.12	0.884
Repeatability	48	6.30	0.131		
Total	59	3760.97			

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.1312	0.19
Repeatability	0.1312	0.19
Reproducibility	0.0000	0.00
operator	0.0000	0.00
Part-To-Part	69.5085	99.81
Total Variation	69.6398	100.00

8

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.36228	2.1737	4.34
Repeatability	0.36228	2.1737	4.34
Reproducibility	0.00000	0.0000	0.00
operator	0.00000	0.0000	0.00
Part-To-Part	8.33718	50.0231	99.91
Total Variation	8.34504	50.0703	100.00

9

Number of Distinct Categories = 32

10

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบระบบการวัดของค่าซิลิกาไดออกไซด์ (3)

ตารางที่ 4.3 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการยอมรับระบบการวัด (AIAG, 2002)

ค่า Gage R&R	ความหมายในการยอมรับ
P/T หรือ P/TV < 10%	อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
10% ≤ P/T หรือ P/TV < 30%	อาจจะยอมรับได้ขึ้นอยู่กับความสำคัญในสิ่งที่ประยุกต์ใช้ ค่าใช้จ่ายในการวัด ตลอดจนปัจจัยอื่นๆ
P/T หรือ P/TV ≥ 30%	ไม่สามารถยอมรับได้ ต้องหาสาเหตุและทำการแก้ไข

สรุปผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าผลประเมินระบบการวัดนี้สามารถยอมรับได้

4.3 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า

การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ส่งผลต่อการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่ใช้ระยะเวลานานมากขึ้น จะดำเนินการโดยระดมความคิดจากผู้ที่มีความชำนาญที่ได้คัดเลือกไว้จากระยะนิยามปัญหา ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้จัดการฝ่ายผลิต วิศวกรฝ่ายผลิต พนักงานฝ่ายผลิต ผู้จัดการฝ่ายคุณภาพ พนักงานฝ่ายคุณภาพ และผู้ดำเนินงานวิจัย ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานระดมความคิดเพื่อหาปัจจัยดังนี้

- ใช้แผนภูมิก้างปลาหรือผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ในการเริ่มต้นระดมสมองเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ การใช้แผนภูมิก้างปลาทำให้รวบรวมสาเหตุ และแยกแยะปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- จากนั้นนำปัจจัยที่ได้จากแผนภูมิก้างปลามาคัดกรองปัจจัยด้วยตารางแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) โดยการระดมสมองเพื่อให้คะแนนตามลำดับความสำคัญในแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน และทำการเรียงลำดับคะแนน
- จากนั้นนำปัจจัยที่ได้คัดกรองแล้วจากตารางแสดงเหตุและผล มาวิเคราะห์ต่อด้วยลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) โดยการระดมสมองจากทีมงานที่ได้ทำการคัดเลือกมา

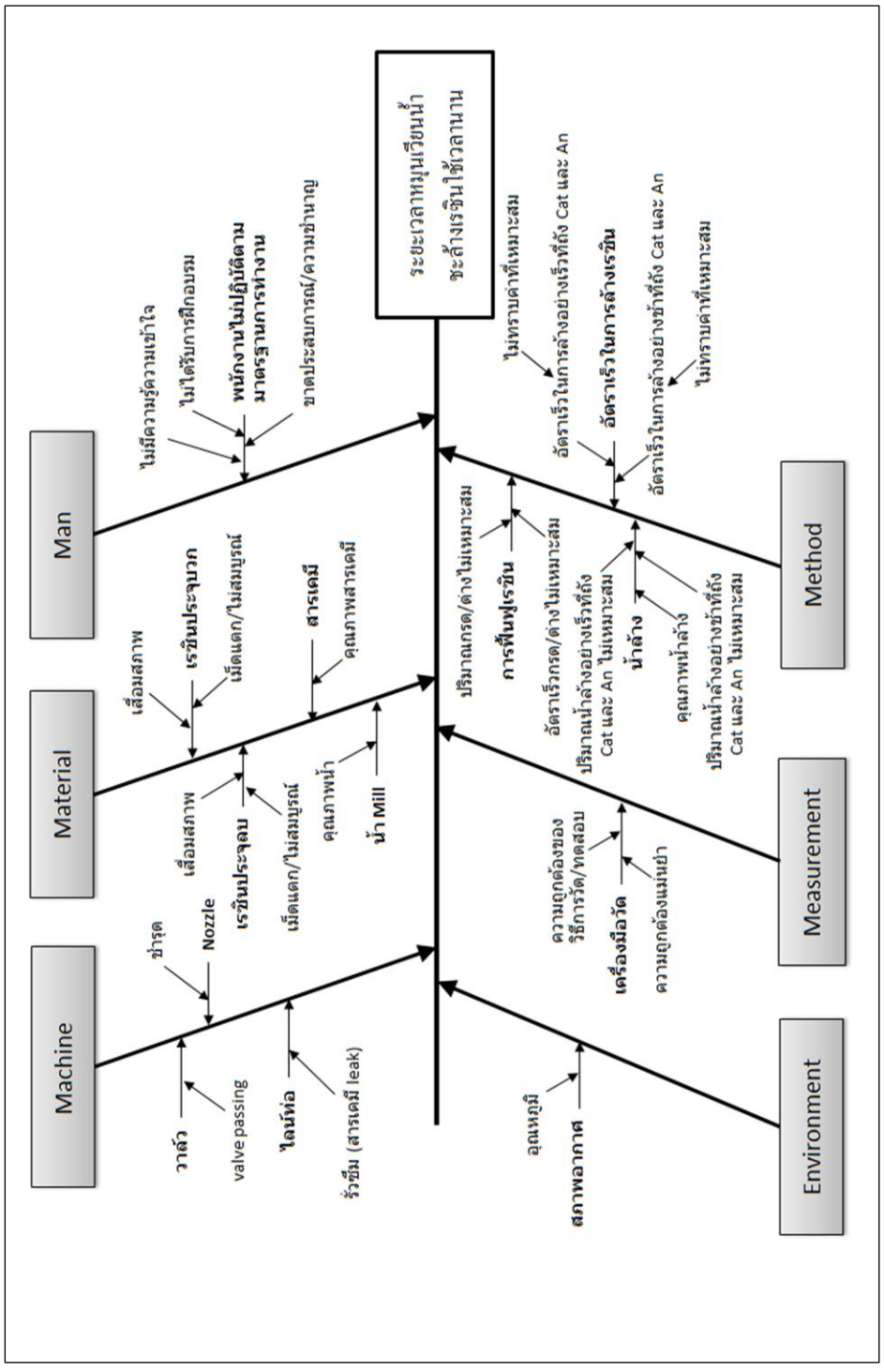
4.3.1 การหาปัจจัยโดยใช้แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram)

การระดมความคิดโดยใช้แผนภูมิก้างปลา จะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาแยกปัจจัยสาเหตุของปัญหาที่ส่งผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน แบ่งออกเป็น 6 หมวดหมู่หลักดังนี้

- ปัจจัยที่เกิดจากพนักงาน (Man)
- ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
- ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
- ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการทำงาน (Method)
- ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการวัด (Measurement)
- ปัจจัยที่เกิดจากสภาพแวดล้อม (Environment)

ผลจากการระดมความคิดจากสมาชิกในทีมเพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่ส่งผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.4 แผนภูมิก้างปลาแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิ่น

4.3.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

จากการระดมสมองโดยใช้แผนภูมิก้างปลาจะได้ปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินทั้งหมด 26 ปัจจัย จากนั้นจึงนำปัจจัยเหล่านี้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) มาใช้ในการคัดกรองปัจจัยที่มีผลกระทบมาก โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการระดมสมองจากสมาชิกในทีม
2. นำข้อมูลปัจจัยทั้งหมด 28 ปัจจัยใส่ในตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยให้สมาชิกทุกคนลงคะแนนให้กับทุกปัจจัย ซึ่งการให้คะแนนขึ้นอยู่กับความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ของแต่ละคน โดยการให้คะแนนแต่ละคนของสมาชิกในทีมเป็นอิสระต่อกันโดยให้คะแนนของตัวเองจนครบไม่มีการปรึกษากัน คะแนนที่ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 9 คะแนนโดยมีเกณฑ์การให้คะแนนดังนี้

   0 = ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนอง

   1 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองน้อยมาก

   3 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองปานกลาง

   9 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองมากที่สุด
3. รวบรวมคะแนนที่ได้ทั้งหมดในแต่ละปัจจัยจากทีมงานทุกคน และพิจารณาทีละปัจจัยโดยมีเกณฑ์การสรุปการให้คะแนนดังนี้

   (1) กรณีคะแนนอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ได้แก่ 0-1, 1-3, 0-3 คะแนน สรุปคะแนนโดยพิจารณาจากจำนวนคะแนนที่มีเสียงมากกว่า จะให้คะแนนตามเสียงข้างมาก เช่น ข้อ 1 มีการให้คะแนน 0 จำนวน 3 คน ให้คะแนน 1 จำนวน 2 คน จะสรุปให้คะแนนข้อ 1 เท่ากับ 0 คะแนน

   (2) กรณีคะแนนไม่เป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน เช่น 0-9, 1-9, 3-9 คะแนน สรุปคะแนนโดยอภิปรายร่วมกันทีละข้อ และใช้คะแนนที่สรุปร่วมกันทีละข้อจนได้คะแนนครบทุกข้อ

4. ผู้ทำวิจัยสรุปคะแนนที่ได้ทั้งหมดในแต่ละปัจจัยลงในตารางแสดงสาเหตุและผล ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากนั้นนำคะแนนที่ได้มาจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยโดยเรียงลำดับคะแนนจากมากไปน้อยดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 4.5

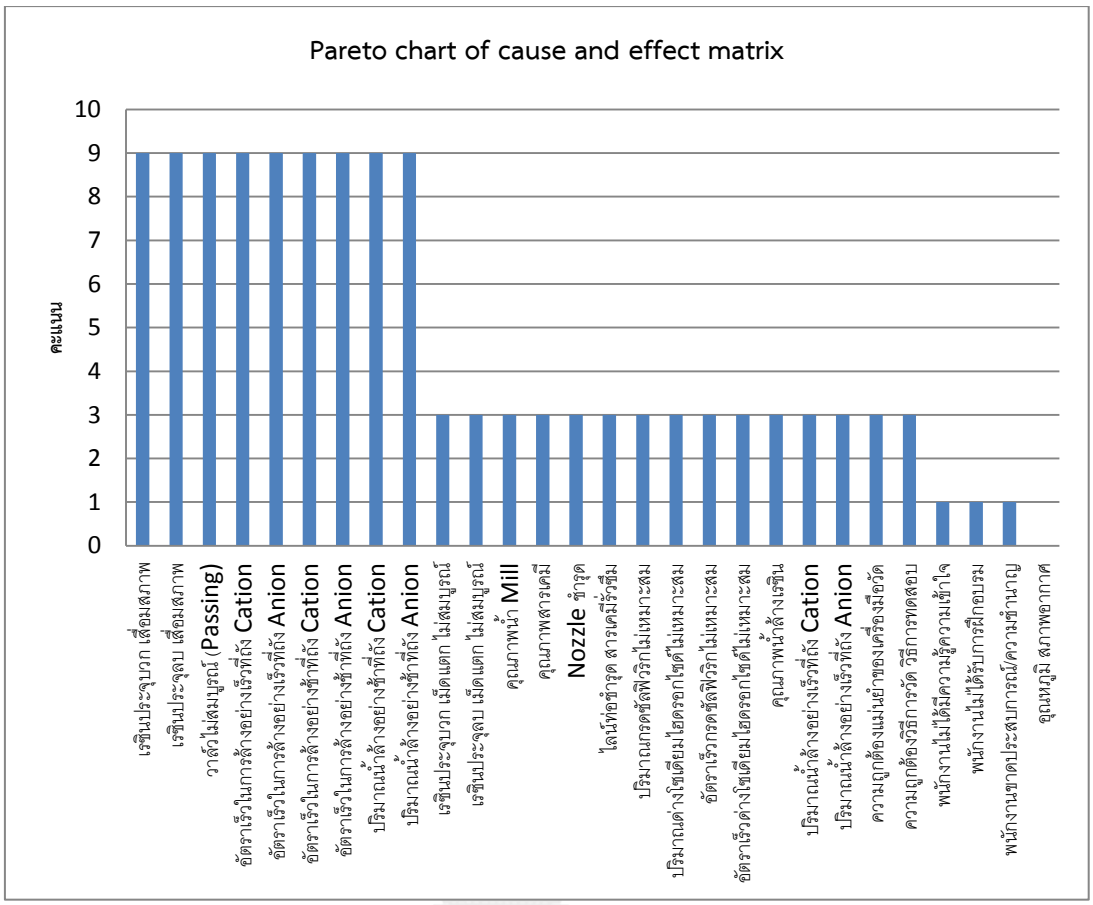
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัย

Cause and Effect Matrix				
Item	**Area cause**	**Process Input**		**Total**
1	Man	พนักงานไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานการทำงาน	ไม่มีความรู้ความเข้าใจ	3
2			ไม่ได้รับการฝึกอบรม	1
3			ขาดประสบการณ์/ความชำนาญ	1
4	Material	เรซินประจุบวก	เสื่อมสภาพ	9
5			เม็ดแตก ไม่สมบูรณ์	3
6		เรซินประจุลบ	เสื่อมสภาพ	9
7			เม็ดแตก ไม่สมบูรณ์	3
8		คุณภาพน้ำ Mill		3
9		คุณภาพสารเคมี		3
10	Machine	Nozzle ชำรุด		3
11		วาล์วไม่สมบูรณ์ (Passing)		9
12		ไลน์ท่อชำรุด สารเคมีรั่วซึม		3
13	Method	การฟื้นฟูเรซิน	ปริมาณกรดซัลฟิวริกไม่เหมาะสม	3
14			ปริมาณด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่เหมาะสม	3
15			อัตราเร็วกรดซัลฟิวริกไม่เหมาะสม	3
16			อัตราเร็วด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่เหมาะสม	3
17		อัตราเร็วในการล้างเรซิน	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation	9
18			อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion	9

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัย (ต่อ)

Cause and Effect Matrix				
Item	**Area cause**	**Process Input**		**Total**
19	Method	อัตราเร็วในการล้างเรซิน	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	9
20			อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	9
21	Method	น้ำล้างเรซิน	คุณภาพน้ำล้างเรซิน	3
22			ปริมาณน้ำล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation	3
23			ปริมาณน้ำล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion	3
24			ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	9
25			ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	9
26	Measurement	เครื่องมือวัด	ความถูกต้องแม่นยำ	3
27			ความถูกต้องวิธีการวัด การทดสอบ	3
28	Environment	อุณหภูมิ สภาพอากาศ		0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.5 แผนภูมิพาเรโตเรียงตามคะแนนความสัมพันธ์ (Cause and Effect Matrix)

จากแผนภูมิพาเรโตรูปที่ 4.5 มีจำนวน 9 ปัจจัยที่มีคะแนนความสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 9 คะแนน จึงนำ 9 ปัจจัยนี้ไปวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) ในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์ลำดับปัจจัย 9 ปัจจัยแรกที่ส่งผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน

Area cause	ปัจจัย
Material	เรซินประจุบวก เสื่อมสภาพ
Material	เรซินประจุลบ เสื่อมสภาพ
Machine	วาล์วไม่สมบูรณ์ (Passing)
Method	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation
Method	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion
Method	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation
Method	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion

ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์ลำดับปัจจัย 9 ปัจจัยแรกที่ส่งผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (ต่อ)

Area cause	ปัจจัย
Method	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation
Method	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion

จากตารางที่ 4.5 แสดง 9 ปัจจัยแรกที่ส่งผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ซึ่งในแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. เรซินประจุบวก (Cation Resin) เรซินประจุบวกที่โรงงานกรณีศึกษาใช้คือ Strong Acid Cation Resin ชนิด Na form อยู่ในถัง Cation Exchanger มีปริมาตรเรซิน 3.0 ลูกบาศก์เมตร ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนบวกในตัวเองกับไอออนบวกในน้ำ เช่น Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} ซึ่งปกติเรซินชนิดนี้มีอายุการใช้งาน 5-7 ปี ปัจจุบันเรซินชนิดนี้มีอายุการใช้งาน 18 ปี ซึ่งมีความเสื่อมสภาพ ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนไอออนบวกในตัวเองกับไอออนบวกในน้ำทำได้ไม่ดี ไอออนบวกที่ไม่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนเหล่านี้จะส่งต่อไปยังถัง Anion Exchanger และส่งผลให้ค่า Conductivity ในน้ำ Anion สูงขึ้นจึงต้องใช้เวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนานมากขึ้น
2. เรซินประจุลบ (Anion Resin) เรซินประจุลบที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษามี 2 ชนิดคือทำหน้าที่ Weak base anion ชนิด OH form มีปริมาตรเรซิน 1.1 ลูกบาศก์เมตร และ Strong base anion ชนิด Cl form มีปริมาตรเรซิน 1.2 ลูกบาศก์เมตร ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนลบในตัวเองกับไอออนลบในน้ำ เช่น Cl^{-}, SiO_2, SO_4^{2-} ซึ่งปกติเรซินชนิดนี้มีอายุการใช้งาน 4-6 ปี ปัจจุบันเรซินชนิดนี้มีอายุการใช้งาน 18 ปีซึ่งมีความเสื่อมสภาพ ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนไอออนลบในตัวเองกับไอออนลบในน้ำทำได้ไม่ดี และมีสารอินทรีย์ตกค้างในเรซินที่ใช้งานเป็นระยะเวลายาวนาน ส่งผลให้สารอินทรีย์เหล่านี้ดูดซับด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ไว้เมื่อมีการฟื้นฟูเรซิน ส่งผลให้ใช้เวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนานมากขึ้น
3. วาล์วไม่สมบูรณ์ (Passing) หากเกิดกรณีวาล์วกรดและด่างที่ใช้ในการฟื้นฟูเรซินปิดไม่สมบูรณ์ มีสารเคมีกรดและด่างรั่วไหลได้เมื่อมีการปิดแล้ว ทำให้มีสารเคมีเข้าในระบบตลอดเวลา ส่งผลให้ใช้เวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนานมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4. อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation การล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation เป็นขั้นตอนที่มีจุดประสงค์เพื่อล้างกรดที่หลงเหลืออยู่จากการล้างอย่างช้า เมื่อมีการใช้อัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม ช้าหรือเร็วเกินไป จะส่งผลต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยเมื่อใช้อัตราเร็วที่เร็วเกินไปจะทำให้ล้างกรดที่หลงเหลืออยู่ในเรซินประจุบวกได้ไม่หมด แต่หากใช้อัตราเร็วที่ช้าเกินไปจะทำให้ใช้ระยะเวลานานมากเกินไป
5. อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion การล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion เป็นขั้นตอนที่มีจุดประสงค์เพื่อล้างด่างที่หลงเหลืออยู่จากการล้างอย่างช้า เมื่อมีการใช้อัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม ช้าหรือเร็วเกินไป จะส่งผลต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยเมื่อใช้อัตราเร็วที่เร็วเกินไปจะทำให้ล้างด่างที่หลงเหลืออยู่ในเรซินประจุลบได้ไม่หมด แต่หากใช้อัตราเร็วที่ช้าเกินไปจะทำให้ใช้ระยะเวลานานมากเกินไป
6. อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation การล้างอย่างช้าที่ถัง Cation เป็นขั้นตอนการล้างที่สำคัญมากมีจุดประสงค์เพื่อล้างกรดที่ใช้ฟื้นฟูเรซินออกให้ได้มากที่สุด เมื่อมีการใช้อัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม ช้าหรือเร็วเกินไป จะส่งผลต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยเมื่อใช้อัตราเร็วที่เร็วเกินไปจะทำให้ล้างกรดที่อยู่ในเรซินประจุบวกได้ไม่หมด แต่หากใช้อัตราเร็วที่ช้าเกินไปจะทำให้ใช้ระยะเวลานานมากเกินไป
7. อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion การล้างอย่างช้าที่ถัง Anion เป็นขั้นตอนการล้างที่สำคัญมากมีจุดประสงค์เพื่อล้างด่างที่ใช้ฟื้นฟูเรซินออกให้ได้มากที่สุด เมื่อมีการใช้อัตราเร็วที่ไม่เหมาะสม ช้าหรือเร็วเกินไป จะส่งผลต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยเมื่อใช้อัตราเร็วที่เร็วเกินไปจะทำให้ล้างด่างที่อยู่ในเรซินประจุลบได้ไม่หมด แต่หากใช้อัตราเร็วที่ช้าเกินไปจะทำให้ใช้ระยะเวลานานมากเกินไป
8. ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation มีต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน หากมีปริมาณน้ำล้างที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการล้างโดยรวมนานมากขึ้น โดยหากมีปริมาณน้ำล้างน้อยเกินไปจะทำให้ล้างกรดในขั้นตอนการล้างอย่างช้าอย่างได้ไม่หมด แต่หากมีปริมาณน้ำมากเกินไปก็อาจสิ้นเปลืองเพราะใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุในขั้นตอนการล้างอย่างช้า
9. ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion มีต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน หากมีปริมาณน้ำล้างที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการล้างโดยรวมนานมากขึ้น โดยหากมี

ปริมาณน้ำล้างน้อยเกินไปจะทำให้ล้างด่างในขั้นตอนการล้างอย่างช้าอย่างได้ไม่หมด แต่หากมีปริมาณน้ำมากเกินไปก็อาจสิ้นเปลืองเพราะใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุในขั้นตอนการล้างช้า

4.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

ในการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) จะนำทั้ง 9 ปัจจัยมาทำการศึกษาลักษณะข้อบกพร่องของปัจจัยต่างๆรวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น เพื่อคัดกรองปัจจัยให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริง เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขกระบวนการต่อไป ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ มีดังนี้

1. จัดตั้งทีมงาน เพื่อระดมสมองในการวิเคราะห์ FMEA ซึ่งเป็นทีมงานเดียวกับทีมที่กำหนดไว้แล้ว ประกอบด้วย ผู้จัดการฝ่ายผลิต วิศวกรฝ่ายผลิต พนักงานฝ่ายผลิต ผู้จัดการฝ่ายคุณภาพ พนักงานฝ่ายคุณภาพ และผู้วิจัย
2. นำปัจจัยที่ได้ทำการคัดกรองมาจาก Cause and Effect Matrix ทั้ง 9 ปัจจัยมาวิเคราะห์ข้อบกพร่องและทำการบันทึก
3. ประเมินความร้ายแรงของผลกระทบของปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วย
    - Severity (S) คือความรุนแรงของผลกระทบ
    - Occurrence (O) คือระดับโอกาสในการเกิดปัญหา
    - Detection (D) คือระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหา
4. ทำการศึกษาวิธีการควบคุมเพื่อป้องกันและแก้ไขการใช้ระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินยาวนานมากเกินไป
5. คำนวณค่า RPN (Risk Priority Number) เป็นการคำนวณค่า S O และ D นำมาคูณกันและบันทึกลงในตารางการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุของข้อบกพร่อง	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN	ปฏิบัติการเสนอแนะ
1	เรซินประจุบวกเสื่อมสภาพ	หลงเหลือไอออนบวกที่ไม่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินประจุบวก ส่งผลให้ค่า Conductivity ในน้ำ Anion สูงขึ้น จึงต้องใช้เวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนานมากขึ้น	3	เรซินถูกใช้งานเป็นเวลานานและอาจมีขั้นตอนในการฟื้นฟูและชะล้างเรซินไม่ดี ทำให้เรซินเสื่อมสภาพเรื่อยๆ	6	ใช้เรซินปัจจุบันที่มีอายุการใช้งาน 18 ปี (เกินกว่าอายุการใช้งานปกติ 5-7 ปี)	9	162	หาไอออนบวกที่หลงเหลือในถัง Cation หากมีไอออนบวกหลงเหลืออยู่ ทำการทดลองเปลี่ยนเรซินประจุบวกเป็นเรซินใหม่
2	เรซินประจุลบเสื่อมสภาพ	หลงเหลือไอออนลบที่ไม่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินประจุลบ และมีสารอินทรีย์ตกค้างในเรซิน ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะดูดซับด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ไว้ ส่งผลให้ใช้เวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนานมากขึ้น	10	เรซินถูกใช้งานเป็นเวลานานและอาจมีขั้นตอนในการฟื้นฟูและชะล้างเรซินไม่ดี ทำให้เรซินเสื่อมสภาพเรื่อยๆ	9	ใช้เรซินปัจจุบันที่มีอายุการใช้งาน 18 ปี (เกินกว่าอายุการใช้งานปกติ 4-6 ปี)	9	810	หาไอออนลบที่หลงเหลือในถัง Anion หากมีไอออนลบหลงเหลืออยู่ ทำการทดลองเปลี่ยนเรซินประจุลบเป็นเรซินใหม่
3	วาล์วไม่สมบูรณ์ (Passing)	มีสารเคมีกรดซัลฟิวริก และด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์รั่วเข้าถังเมื่อมีการฟื้นฟูเรซิน ส่งผลให้ใช้เวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนานมากขึ้น	4	วาล์วปิดไม่สนิทเมื่อมีการสั่งปิดด้วยระบบอัตโนมัติแล้ว (เกิดการ Passing อยู่)	5	ใช้วาล์วที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ โดยมีการตรวจสอบการรั่วของสารเคมีเมื่อมีการหยุดซ่องบำรุง	6	120	ตรวจสอบการ Passing ของวาล์ว เป็นประจำทุกเดือน

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (ต่อ)

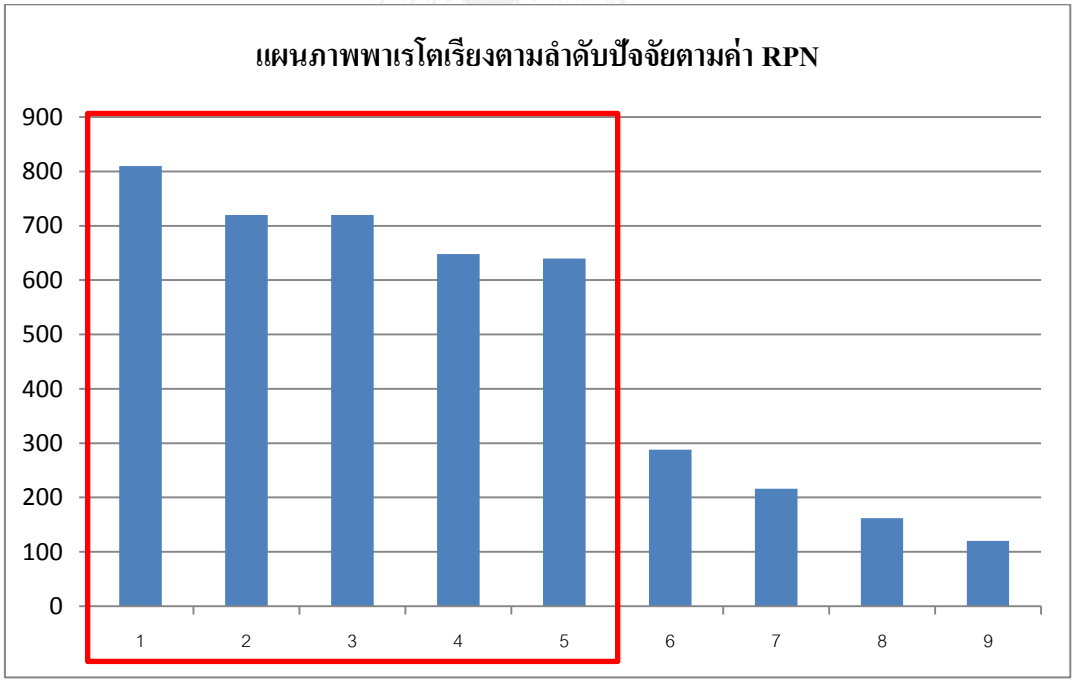
ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุของข้อบกพร่อง	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN	ปฏิบัติการเสนอแนะ
4	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation	ล้างกรดซัลฟิวริกที่หลงเหลืออยู่ในเรซินประจุบวกได้ไม่หมด	3	ไม่ทราบอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation	9	ใช้อัตราเร็วจากการทดลองเดินเครื่องจักรเมื่อเริ่มต้นสร้างโรงงาน (Commissioning)	8	216	ทดลองหาอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation
5	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion	ล้างด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่หลงเหลืออยู่ในเรซินประจุลบได้ไม่หมด	4	ไม่ทราบอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion	9	ใช้อัตราเร็วจากการทดลองเดินเครื่องจักรเมื่อเริ่มต้นสร้างโรงงาน (Commissioning)	8	288	ทดลองหาอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion
6	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	ล้างกรดซัลฟิวริกที่อยู่ในเรซินประจุบวกได้ไม่หมด	8	ไม่ทราบอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	8	ใช้อัตราเร็วจากการทดลองเดินเครื่องจักรเมื่อเริ่มต้นสร้างโรงงาน (Commissioning)	10	640	ทดลองหาอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation
7	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	ล้างด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในเรซินประจุลบได้ไม่หมด	9	ไม่ทราบอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	8	ใช้อัตราเร็วจากการทดลองเดินเครื่องจักรเมื่อเริ่มต้นสร้างโรงงาน (Commissioning)	10	720	ทดลองหาอัตราเร็วที่เหมาะสมในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (ต่อ)

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุของข้อบกพร่อง	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN	ปฏิบัติการเสนอแนะ
8	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	ล้างกรดซัลฟิวริกในขั้นตอนการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation ได้ไม่หมด	9	ไม่ทราบปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation ที่เหมาะสม	9	ใช้ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation จากการทดลองเดินเครื่องจักรเมื่อเริ่มต้นสร้างโรงงาน (Commissioning)	8	648	ทดลองหาปริมาณน้ำล้างที่เหมาะสมในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation
9	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	ล้างด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ได้ไม่หมด	10	ไม่ทราบปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ที่เหมาะสม	9	ใช้ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion จากการทดลองเดินเครื่องจักรเมื่อเริ่มต้นสร้างโรงงาน (Commissioning)	8	720	ทดลองหาปริมาณน้ำล้างที่เหมาะสมในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion

ตารางที่ 4.8 เรียงลำดับปัจจัยตามค่า RPN ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ FMEA

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	RPN
1	เรซินประจุลบ เสื่อมสภาพ	810
2	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	720
3	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	720
4	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	648
5	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	640
6	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion	288
7	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation	216
8	เรซินประจุบวก เสื่อมสภาพ	162
9	วาล์วไม่สมบูรณ์ (Passing)	120



รูปที่ 4.6 แผนภาพพาเรโตเรียงตามลำดับปัจจัยตามค่า RPN

จากการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ได้ค่า RPN (Risk Priority Number) ของแต่ละปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากนั้นนำคะแนนของแต่ละปัจจัยมาเรียงลำดับจากมากไปน้อยตามค่า RPN ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และนำสร้างเป็นแผนภาพพาเรโตเรียง

ตามลำดับปัจจัยตามค่า RPN ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าจากทั้งหมด 9 ปัจจัยมี 5 ปัจจัยที่มีคะแนนสูงโดดเด่นกว่าปัจจัยอื่นๆ จึงคัดเลือกมาทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 ปัจจัยที่คัดเลือกจากการวิเคราะห์ FMEA เพื่อทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	RPN
1	เรซินประจุลบ เสื่อมสภาพ	810
2	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	720
3	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	720
4	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	648
5	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	640

จากตารางที่ 4.8 แสดงถึงปัจจัยที่ถูกคัดเลือกมา โดยพิจารณาจากคะแนน RPN 5 ลำดับแรก ได้แก่ ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation มีผลรวมคะแนนทั้ง 5 ปัจจัยเท่ากับ 3,538 คะแนน จากคะแนนทั้งหมด 4,324 คะแนน คิดเป็น 82% ของคะแนนรวมทั้งหมด

4.4 สรุประยะตรวจวัดปัญหา

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ซึ่งมี 2 ส่วนหลักคือการวิเคราะห์ระบบการวัดและการหาสาเหตุของปัญหา โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดเพื่อให้มั่นใจได้ว่าระบบการวัดจะให้ค่าที่เชื่อถือได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งระบบการวัดเป็น 2 กลุ่มได้แก่ การวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต ได้แก่ เครื่องมือระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (Recirculate rinse time) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าออนไลน์ (Conductivity online) และเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เครื่องมือวัดค่า pH (pH meter) และเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ซึ่งทุกเครื่องมือวัดได้รับการสอบเทียบตามระบบ ISO 9001 ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาได้รับการรับรองระบบคุณภาพนี้ ดังนั้นการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตมีความน่าเชื่อถืออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และได้ทำการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงระบบการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) โดยมีเกณฑ์ที่ยอมรับ ความผันแปรจากระบบการวัดเทียบกับความผันแปรจากลักษณะตัวอย่าง (%SV หรือ P/TV) น้อยกว่า 10% จึงจะใน

เกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากการตรวจสอบความสมารถของพนักงาน ได้ผลการตรวจสอบของพนักงานมีค่า %P/TV เท่ากับ 4.34% ซึ่งน้อยกว่า 10% จึงสรุปว่าระบบการวัดนี้มีความแม่นยำและความผันแปรอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

จากนั้นศึกษาหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหาระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลานาน ซึ่งดำเนินการด้วยการวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิก้างปลา ระดมสมองจากทีมงานที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเรื่องกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ หาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด 28 ปัจจัย จากนั้นนำ 28 ปัจจัยมาคัดกรองโดยตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) ให้คะแนนตามลำดับความสำคัญ ทำให้เหลือ 9 ปัจจัย จึงนำปัจจัยเหล่านั้นไปวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) เพื่อคัดกรองปัจจัยให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินโดย เรียงลำดับความสำคัญจากคะแนน RPN ทำให้พบว่ามีปัจจัยมีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินทั้งสิ้น 5 ปัจจัยได้แก่ ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation จากนั้นจึงนำปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองเหล่านี้ ไปวิเคราะห์ในบทต่อไปเพื่อยืนยันว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างแท้จริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
ระยะวิเคราะห์สาเหตุปัญหา (Analysis Phase)

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือกจากบทที่ 4 มาหาปัจจัยที่มีผลอย่างแท้จริง โดยการทดสอบทางสถิติว่าปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือกทั้งหมด 5 ปัจจัยได้แก่ ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation มีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยทำการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^{k-1} ด้วยแบบจำลองในระดับปฏิบัติการ เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริง

5.2 ปัจจัยนำเข้าที่นำมาทดสอบสมมติฐาน

จากระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบแล้ว สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่อาจมีผลทำให้ระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้ระยะเวลานานมีจำนวน 5 ปัจจัย ดังนี้

1. ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ
2. อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion
3. ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion
4. ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation
5. อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation

ลักษณะการทดสอบในแต่ละปัจจัยใช้การจำลองรูปแบบกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุในระดับปฏิบัติการ (Lab scale) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีรายละเอียดชนิดของเรซินและปริมาณเรซินดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 2^{k-1} จากระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหาได้ปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือกทั้งหมด 5 ปัจจัย แบบการทดลองที่ใช้เป็นแบบ Factorial design แบบ 2^{5-1} กำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 5.1

รูปที่ 5.1 แบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุในระดับปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.1 ชนิดและปริมาณเรซินของแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

คอลัมน์	**ชนิดเรซิน**	**ปริมาณเรซิน**
Cation	Amberjet 1000Na	1.0 ลิตร
Anion	Amberlite IRA 96 RF	0.5 ลิตร
	Amberjest 4200Cl	0.5 ลิตร
Mixbed	Amberjet 1000H	0.2 ลิตร
	Amberjest 4200Cl	0.2 ลิตร

ตารางที่ 5.2 ปัจจัยและระดับในการการทดลอง 2^{5-1} Factorial design

ลำดับ	**ปัจจัยนำเข้า**	**หน่วย**	**สัญลักษณ์**	**ระดับของปัจจัย**	
				ต่ำ (-1)	**สูง (1)**
1	เรซินประจุลบ	-	A	เก่า	ใหม่
2	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	ลิตรต่อนาที	B	0.01	0.10
3	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	ลิตร	C	2	6

ตารางที่ 5.2 ปัจจัยและระดับในการการทดลอง 2^{5-1} Factorial design (ต่อ)

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า	หน่วย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย	
				ต่ำ (-1)	สูง (1)
4	ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	ลิตร	D	2	6
5	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	ลิตรต่อนาที	E	0.05	0.30

5.3 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองในการทดลองคือระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยคิดจากระยะเวลาที่เริ่มหมุนเวียนน้ำจาก Mixbed เข้าคอลัมน์ Cation จนกระทั่งคุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ Anion น้อยกว่า 2.0 μS/cm น้ำ Mixed bed น้อยกว่า 1.0 μS/cm และค่าซิลิกาน้อยกว่า 20 ppb

5.4 การออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-1} แฟคทอเรียล มีปัจจัย 5 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

1. การสุ่ม (Randomization) เป็นการทำลำดับของการทดลองในแต่ละการทดลองเป็นแบบสุ่ม เพื่อลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจมีผลต่อผลการทดลอง ซึ่งในการออกแบบการทดลองนี้ ใช้การสุ่มลำดับในการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab
2. จำนวนการทดลอง (Runs) ในการทดลองนี้มี 5 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ มีระดับทั้งหมด 10 ระดับ ทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง

5.5 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองนี้มีทั้งหมด 16 การทดลอง ในแต่ละการทดลองจะกำหนดปัจจัยอื่นๆที่ไม่ใช่ปัจจัยที่ศึกษาเพื่อควบคุมสภาวะการทดลองให้เหมือนกันทุกการทดลอง เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อผลการทดลอง สิ่งต่างๆที่ต้องควบคุมมีดังนี้

- ใช้พนักงานคนเดียวกันในการควบคุมปริมาณน้ำและอัตราเร็วทุกการทดลอง
- ใช้อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆได้แก่ คอลัมน์ เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Flow meter)

ปริมาณเรซินประจุบวก นาฬิกาจับเวลา เครื่องวัดการดูดกลืนแสง เหมือนกันทุกการทดลอง

- พนักงานวัดค่าการนำไฟฟ้า และค่าซิลิกา คนเดียวกันทุกการทดลอง
- คุณภาพน้ำที่ใช้ในขั้นตอนชะล้างเรซินอย่างช้า ควบคุมคุณภาพโดยใช้น้ำปราศจากแร่ธาตุ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.5-0.7 μS/cm ทุกการทดลอง

ในแต่ละการทดลองทำการทดลองระดับของปัจจัยตามที่กำหนดในตารางที่ 5.3 ดำเนินลำดับการทดลองตามเลขที่เรียงในช่อง StdOrder ตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าซิลิกาของน้ำ Anion และ Mixbed ทุก 10-30 นาที

5.6 ผลการทดลอง

ผลการทดลองศึกษาปัจจัยที่แท้จริงที่มีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน แสดงในช่องเวลา (นาที) ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในการทดลอง 2^{5-1} Factorial design

Std Order	Run Order	Center Pt	Blocks	A	B	C	D	E	เวลา (นาที)
3	1	1	1	old	0.3	2	2	0.01	180
5	2	1	1	old	0.05	6	2	0.01	360
6	3	1	1	new	0.05	6	2	0.1	60
13	4	1	1	old	0.05	6	6	0.1	270
7	5	1	1	old	0.3	6	2	0.1	120
12	6	1	1	new	0.3	2	6	0.01	30
16	7	1	1	new	0.3	6	6	0.1	15
14	8	1	1	new	0.05	6	6	0.01	120
1	9	1	1	old	0.05	2	2	0.1	300
4	10	1	1	new	0.3	2	2	0.1	30
9	11	1	1	old	0.05	2	6	0.01	360
11	12	1	1	old	0.3	2	6	0.1	120
15	13	1	1	old	0.3	6	6	0.01	180
10	14	1	1	new	0.05	2	6	0.1	90
8	15	1	1	new	0.3	6	2	0.01	40
2	16	1	1	new	0.05	2	2	0.01	150

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองค่าคุณภาพน้ำ Anion ในการทดลอง 2^{5-1} Factorial design

Std Order	A	B	C	D	E	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ซิลิกาไดออกไซด์ (ppb)
3	old	0.3	2	2	0.01	9.74	1.89	8.5
5	old	0.05	6	2	0.01	8.64	1.80	19.5
6	new	0.05	6	2	0.1	8.84	1.77	18.5
13	old	0.05	6	6	0.1	9.78	1.99	5.1
7	old	0.3	6	2	0.1	9.71	1.65	8.0
12	new	0.3	2	6	0.01	8.77	1.45	5.7
16	new	0.3	6	6	0.1	8.19	1.55	4.6
14	new	0.05	6	6	0.01	8.02	1.28	2.5
1	old	0.05	2	2	0.1	9.50	1.74	13.1
4	new	0.3	2	2	0.1	8.78	1.79	4.0
9	old	0.05	2	6	0.01	9.95	1.95	6.3
11	old	0.3	2	6	0.1	9.00	1.89	10.8
15	old	0.3	6	6	0.01	8.79	1.76	15.5
10	new	0.05	2	6	0.1	8.79	1.86	4.0
8	new	0.3	6	2	0.01	8.69	1.56	5.1
2	new	0.05	2	2	0.01	8.71	1.75	6.3

ผลการทดลองคุณภาพน้ำ Anion มีค่า pH มากกว่า 8.0, ค่าการนำไฟฟ้า น้อยกว่า 2.0 μS/cm และค่าซิลิกาไดออกไซด์น้อยกว่า 20 ppb มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองค่าคุณภาพน้ำ Mixbed ในการทดลอง 2^{5-1} Factorial design

Std Order	A	B	C	D	E	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ซิลิกาไดออกไซด์ (ppb)
3	old	0.3	2	2	0.01	6.82	0.51	5.7
5	old	0.05	6	2	0.01	6.93	0.60	6.5
6	new	0.05	6	2	0.1	6.72	0.66	9.7
13	old	0.05	6	6	0.1	6.52	0.41	2.9
7	old	0.3	6	2	0.1	6.54	0.51	1.1
12	new	0.3	2	6	0.01	6.54	0.39	3.4
16	new	0.3	6	6	0.1	6.57	0.33	2.8
14	new	0.05	6	6	0.01	6.50	0.50	1.7
1	old	0.05	2	2	0.1	6.67	0.38	2.9
4	new	0.3	2	2	0.1	6.74	0.29	1.7
9	old	0.05	2	6	0.01	6.73	0.46	2.9
11	old	0.3	2	6	0.1	6.82	0.65	3.5
15	old	0.3	6	6	0.01	6.73	0.82	5.5
10	new	0.05	2	6	0.1	6.56	0.88	2.3
8	new	0.3	6	2	0.01	6.51	0.29	6.3
2	new	0.05	2	2	0.01	6.72	0.41	4.6

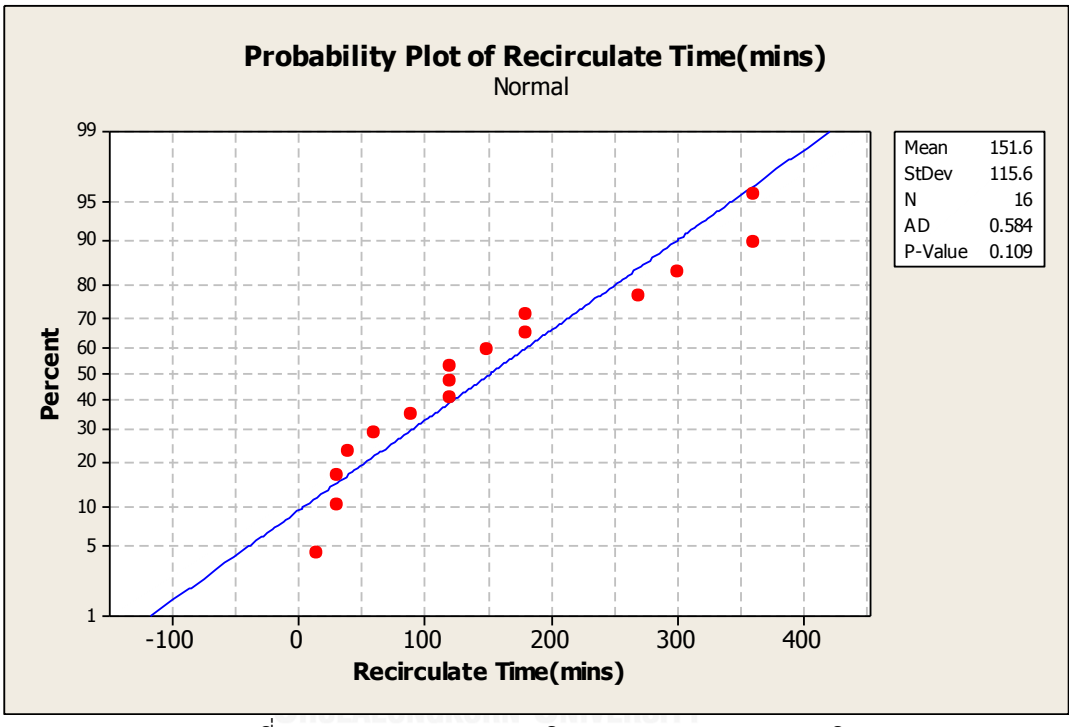
ผลการทดลองคุณภาพน้ำ Mixbed มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7.5, ค่าการนำไฟฟ้า น้อยกว่า 1.0 μS/cm และค่าซิลิกาไดออกไซด์น้อยกว่า 20 ppb มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.7 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ก่อนวิเคราะห์ผลต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานในการตรวจสอบอยู่ 3 ข้อได้แก่ สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานความเป็นอิสระ และสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนข้อมูล โดยจะทำการทดสอบด้วยโปรแกรม Minitab

5.7.1 สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

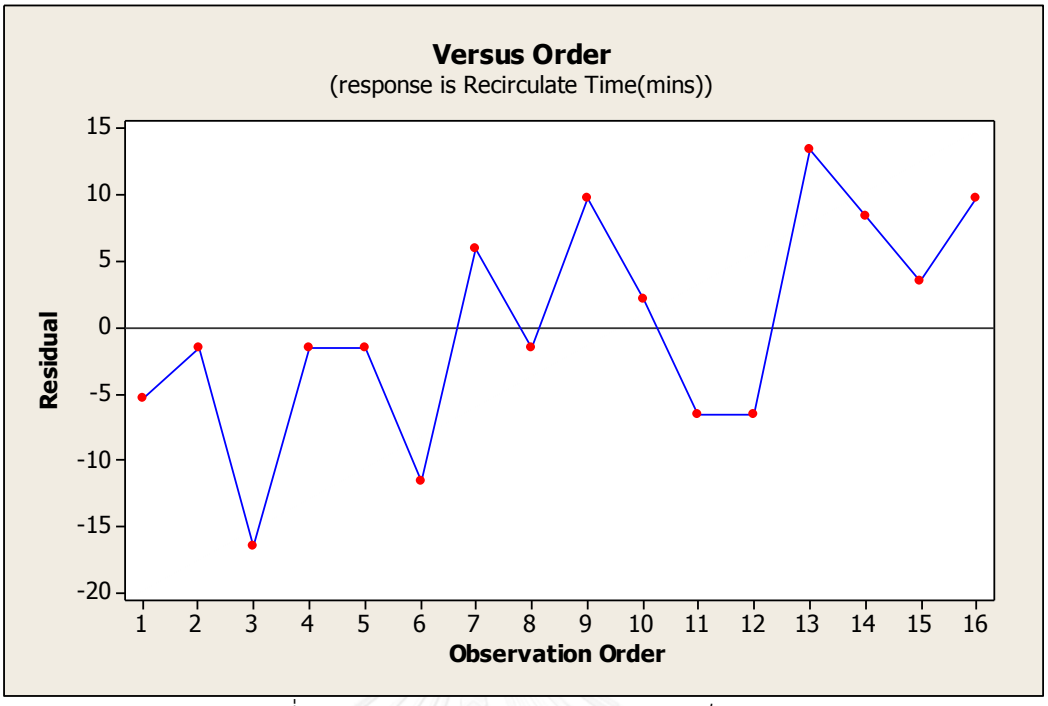
การทดสอบนี้ทำเพื่อทดสอบการแจกแจงของข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง มีการแจกแจงแบบปกติ (Normality) หรือไม่ โดยนำข้อมูล Residual ของค่าตัวแปรตอบสนองมาพล็อตกราฟ หากกราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จะสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ผลการทดสอบได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่า ค่า P-value เท่ากับ 0.109 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

5.7.2 สมมติฐานความเป็นอิสระ

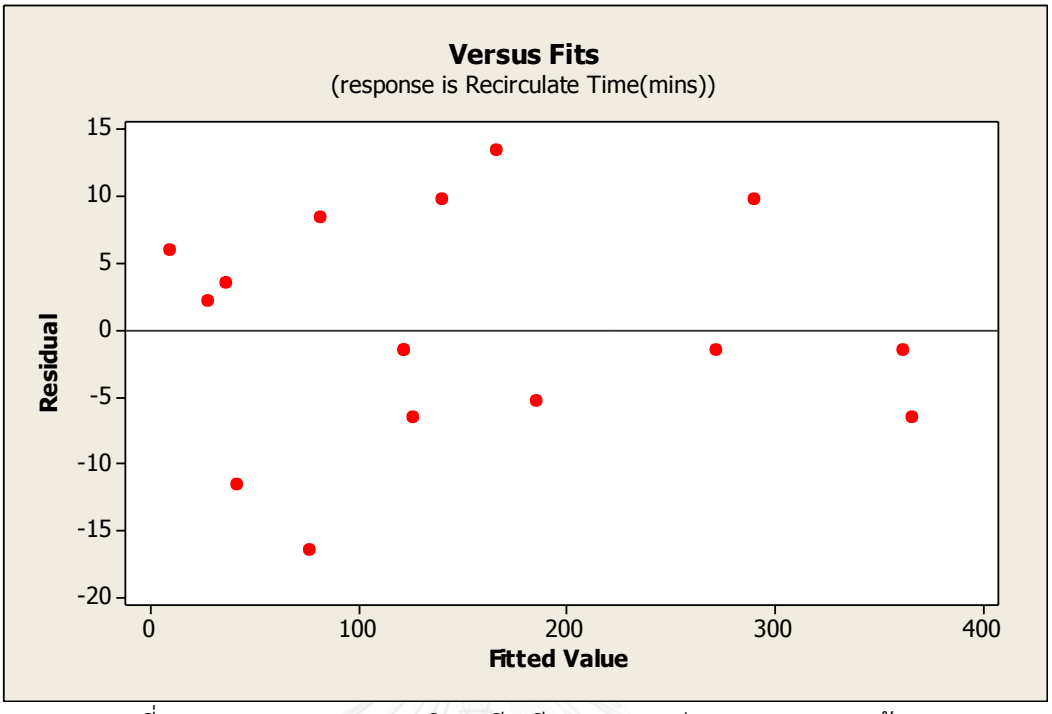
การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อทดสอบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยพิจารณาจากข้อมูล Residual กับลำดับในการทดลอง หากกราฟที่ได้มีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ ไม่มีแนวโน้ม จะสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ผลการทดสอบได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ

5.7.3 สมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล

การทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล ทำได้โดยพิจารณาจากข้อมูล Residual กับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย หากกราฟที่ได้มีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ ไม่มีแนวโน้ม จะสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ผลการทดสอบได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะกระจายตัวไม่มีรูปแบบที่แน่ชัด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล



รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบสมมติฐานมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล

จากการทดสอบสมมติฐานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล มีสมมติฐานผ่านข้อกำหนด จึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติได้

5.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 5.3 มาวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 5.5

Factorial Fit: Recirculate Time(mins) versus A, B, C, D, E

Analysis of Variance for Recirculate Time(mins) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	188145	188145	37629	257.37	0.000
A	1	114752	114752	114752	784.87	0.000
B	1	61877	61877	61877	423.22	0.000
C	1	564	564	564	3.86	0.090
D	1	189	189	189	1.29	0.293
E	1	10764	10764	10764	73.62	0.000
2-Way Interactions	3	11217	11217	3739	25.57	0.000
A*B	1	9264	9264	9264	63.36	0.000
A*E	1	977	977	977	6.68	0.036
B*E	1	977	977	977	6.68	0.036
Residual Error	7	1023	1023	146		
Total	15	200386				

S = 12.0915 PRESS = 5346.94
R-Sq = 99.49% R-Sq(pred) = 97.33% R-Sq(adj) = 98.91%

รูปที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน

จากรูปที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน จะพิจารณาที่ค่า P-value หากมีค่าน้อยกว่า 0.05 จะสรุปได้ว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากรูปจะเห็นได้ว่ามีผลกระทบจากปัจจัยหลัก ได้แก่ปัจจัย A B และ Eคือเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation และมีผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยได้แก่ ปัจจัย A และ B มีค่า P-value น้อยกว่า 0.0005 ปัจจัย A และ E มีค่า P-value เท่ากับ 0.036 และปัจจัย B และ E มีค่า P-value เท่ากับ 0.036 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริงได้แก่ 3 ปัจจัยคือ ปัจจัย เรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation และมีผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย ซึ่งจะนำปัจจัยหลักเหล่านี้ไปทำการทดลองหาระดับที่เหมาะสมต่อไป

5.9 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา เป็นการนำปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองจากเครื่องมือทางสถิติต่างๆมาทดสอบสมมติฐานโดยการทำการทดลองแบบ 2^{k-1} factorial design เพื่อหาปัจจัยที่แท้จริงที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 5 ปัจจัยได้แก่ ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง

Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation ทำการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง จากผลการทดลองพบว่ามี 3 ปัจจัยได้แก่ ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation ที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะนำปัจจัยเหล่านี้ไปทำการทดลองหาระดับที่เหมาะสมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
ระยะปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve Phase)

6.1 บทนำ

เมื่อได้วิเคราะห์หาปัจจัยที่แท้จริงที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ซึ่งมี 3 ปัจจัย ได้แก่ เรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion และปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion จะนำปัจจัยเหล่านี้มาปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ โดยทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเพื่อหาระดับที่เหมาะสมในแต่ละปัจจัยให้มีระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุด แล้วทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ และสรุปค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ

6.2 ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

ปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการทดลองคือ ปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือกและทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยในระยะการวิเคราะห์หาปัจจัยที่แท้จริง มี 3 ปัจจัยดังนี้

1. เรซินประจุลบ
2. อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion
3. อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation

นำทั้ง 3 ปัจจัยนี้มากำหนดระดับในการทดลอง ลักษณะการทดสอบในแต่ละปัจจัยจะใช้การจำลองรูปแบบกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุในระดับปฏิบัติการ (Lab scale) โดยทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยจากค่าปัจจุบันที่ควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ และค่าที่สามารถควบคุมได้จริงในระดับโรงงานและระดับปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ปัจจัยและระดับในการการทดลองแฟคทอเรียล

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า	หน่วย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
				ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
1	เรซินประจุลบ	-	A	เก่า	-	ใหม่
2	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	ลิตรต่อนาที	B	0.05	0.15	0.30
3	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	ลิตรต่อนาที	C	0.01	0.05	0.10

6.3 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองในการทดลองคือระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยคิดจากระยะเวลาที่เริ่มหมุนเวียนน้ำจาก Mixbed เข้าคอลัมน์ Cation จนกระทั่งค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ Anion น้อยกว่า 2.0 μS/cm น้ำ Mixed bed น้อยกว่า 1.0 μS/cm และค่าซิลิกาน้อยกว่า 20 ppb

6.4 การออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล มีปัจจัย 3 ปัจจัย ระดับทั้งหมด 8 ระดับ มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

1. การทดลองซ้ำ (Replication) การทดลองซ้ำเป็นการทำการทดลองที่มีระดับของปัจจัยต่างๆเหมือนเดิม ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้มั่นใจในผลการทดลอง
2. การสุ่ม (Randomization) มีการทำลำดับของการทดลองในแต่ละการทดลองเป็นแบบสุ่ม เพื่อลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจมีผลต่อผลการทดลอง ซึ่งในการออกแบบการทดลองนี้ ใช้การสุ่มลำดับในการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab
3. จำนวนการทดลอง (Runs) การทดลองนี้มี 3 ปัจจัย มีระดับทั้งหมด 8 ระดับ ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 36 การทดลอง

6.5 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองนี้มีทั้งหมด 36 การทดลอง ในแต่ละการทดลองจะกำหนดปัจจัยอื่นๆที่ไม่ใช่ปัจจัยที่ศึกษาเพื่อควบคุมสภาวะการทดลองให้เหมือนกันทุกการทดลอง เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อผลการทดลอง สิ่งต่างๆที่ต้องควบคุมมีดังนี้

- ใช้พนักงานคนเดียวกันในการควบคุมปริมาณน้ำและอัตราเร็วทุกการทดลอง
- ใช้อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆได้แก่ คอลัมน์ เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Flow meter) ปริมาณเรซินประจุบวก นาฬิกาจับเวลา เครื่องวัดการดูดกลืนแสงเหมือนกันทุกการทดลอง
- พนักงานวัดค่าการนำไฟฟ้า และค่าซิลิกา คนเดียวกันทุกการทดลอง

ในแต่ละการทดลองทำการทดลองระดับของปัจจัยตามที่กำหนดในตารางที่ 6.2 ดำเนินลำดับการทดลองตามเลขที่เรียงในช่อง StdOrder ตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าซิลิกาของน้ำ Anion และ Mixbed ทุก 10-30 นาที

6.6 ผลการทดลอง

ผลการทดลองศึกษาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ใช้ระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุดแสดงในช่องเวลา (นาที) ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล

Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	A	B	C	เวลา (นาที)
6	1	1	1	old	0.15	0.10	120
11	2	1	1	new	0.05	0.05	60
23	3	1	1	old	0.15	0.05	270
22	4	1	1	old	0.15	0.01	240
33	5	1	1	new	0.15	0.10	20
1	6	1	1	old	0.05	0.01	210
5	7	1	1	old	0.15	0.05	270
8	8	1	1	old	0.30	0.05	300
31	9	1	1	new	0.15	0.01	45
36	10	1	1	new	0.30	0.10	45
15	11	1	1	new	0.15	0.10	15
13	12	1	1	new	0.15	0.01	60
26	13	1	1	old	0.30	0.05	300
34	14	1	1	new	0.30	0.01	90
10	15	1	1	new	0.05	0.01	60
27	16	1	1	old	0.30	0.10	220
28	17	1	1	new	0.05	0.01	70
9	18	1	1	old	0.30	0.10	230
12	19	1	1	new	0.05	0.10	90
4	20	1	1	old	0.15	0.01	250
2	21	1	1	old	0.05	0.05	210
35	22	1	1	new	0.30	0.05	150

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	เวลา (นาที)
16	23	1	1	new	0.30	0.01	95
25	24	1	1	old	0.30	0.01	295
19	25	1	1	old	0.05	0.01	200
29	26	1	1	new	0.05	0.05	70
24	27	1	1	old	0.15	0.10	150
17	28	1	1	new	0.30	0.05	150
3	29	1	1	old	0.05	0.10	150
18	30	1	1	new	0.30	0.10	50
30	31	1	1	new	0.05	0.10	55
21	32	1	1	old	0.05	0.10	180
20	33	1	1	old	0.05	0.05	230
14	34	1	1	new	0.15	0.05	120
7	35	1	1	old	0.30	0.01	360
32	36	1	1	new	0.15	0.05	120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

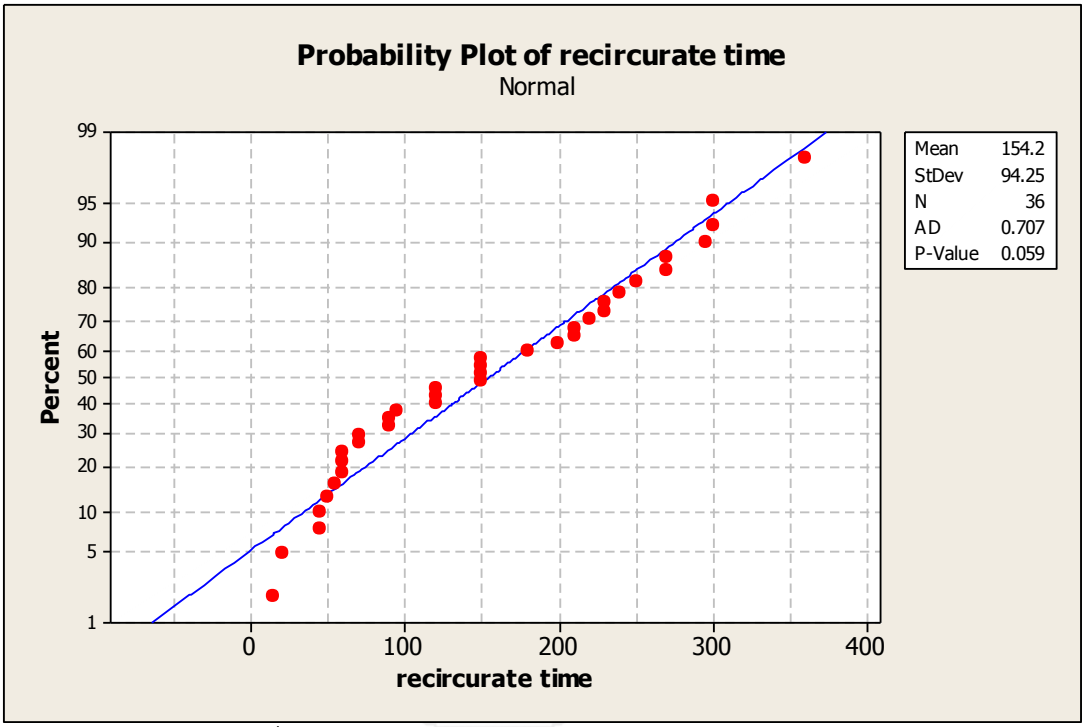
6.7 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ก่อนวิเคราะห์ผลต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานในการตรวจสอบอยู่ 3 ข้อได้แก่ สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานความเป็นอิสระ และสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนข้อมูล โดยจะทำการทดสอบด้วยโปรแกรม Minitab

6.7.1 สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

การทดสอบนี้ทำเพื่อทดสอบการแจกแจงของข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง มีการแจกแจงแบบปกติ (Normality) หรือไม่ โดยนำข้อมูล Residual ของค่าตัวแปรตอบสนองมาพล็อตกราฟ หากกราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จะสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ผลการทดสอบได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่ากราฟ

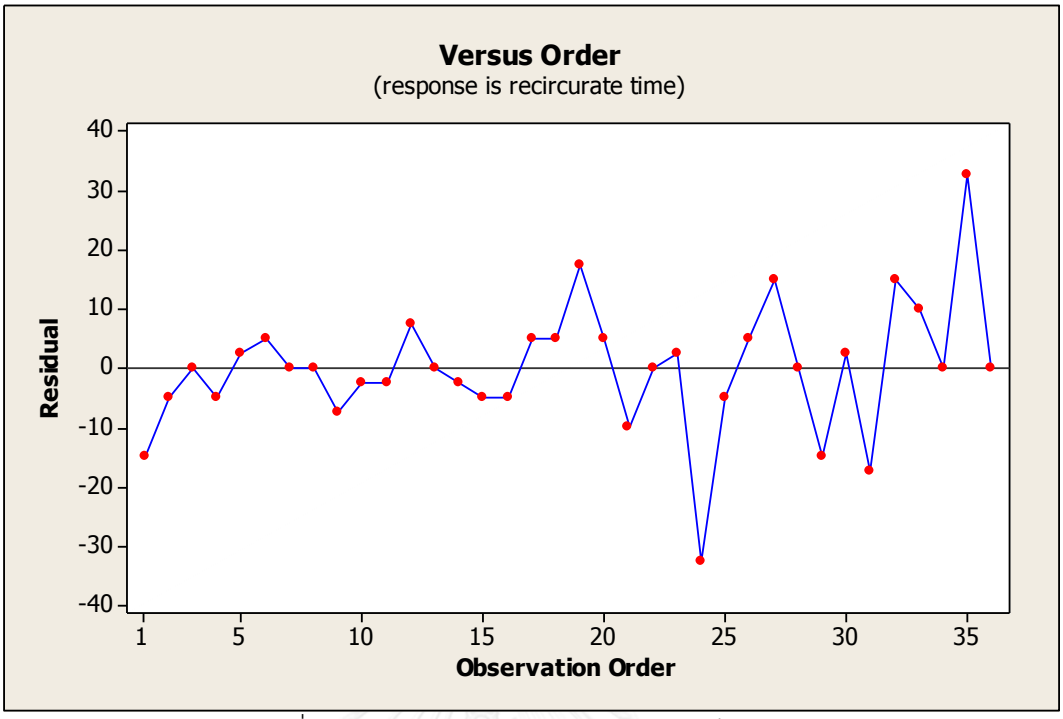
มีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่า ค่า P-value เท่ากับ 0.059 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

6.7.2 สมมติฐานความเป็นอิสระ

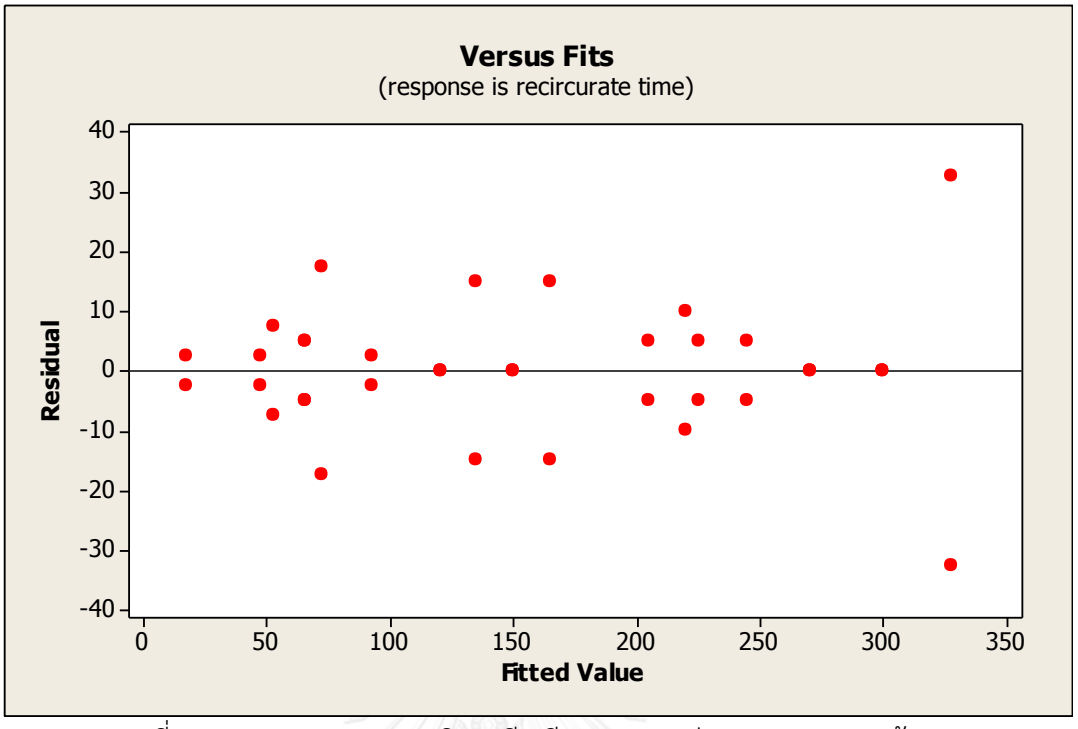
การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อทดสอบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยพิจารณาจากข้อมูล Residual กับลำดับในการทดลอง หากกราฟที่ได้มีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ ไม่มีแนวโน้ม จะสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ผลการทดสอบได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 6.2 ผลการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ

6.7.3 สมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล

การทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล ทำได้โดยพิจารณาจากข้อมูล Residual กับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย หากกราฟที่ได้มีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ ไม่มีแนวโน้ม จะสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ผลการทดสอบได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะกระจายตัวไม่มีรูปแบบที่แน่ชัด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล



รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบสมมติฐานมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล

จากการทดสอบสมมติฐานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล มีสมมติฐานผ่านข้อกำหนด จึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 6.2 มาวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 6.4

General Linear Model: recircurate time versus A, B, C

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	2	old, new
B	fixed	3	0.05, 0.15, 0.30
C	fixed	3	0.01, 0.05, 0.10

Analysis of Variance for recircurate time, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	220900	220900	220900	941.11	0.000
B	2	24029	24029	12015	51.19	0.000
C	2	37604	37604	18802	80.10	0.000
A*B	2	5154	5154	2577	10.98	0.001
A*C	2	5513	5513	2756	11.74	0.001
B*C	4	10292	10292	2573	10.96	0.000
A*B*C	4	3208	3208	802	3.42	0.030
Error	18	4225	4225	235		
Total	35	310925				

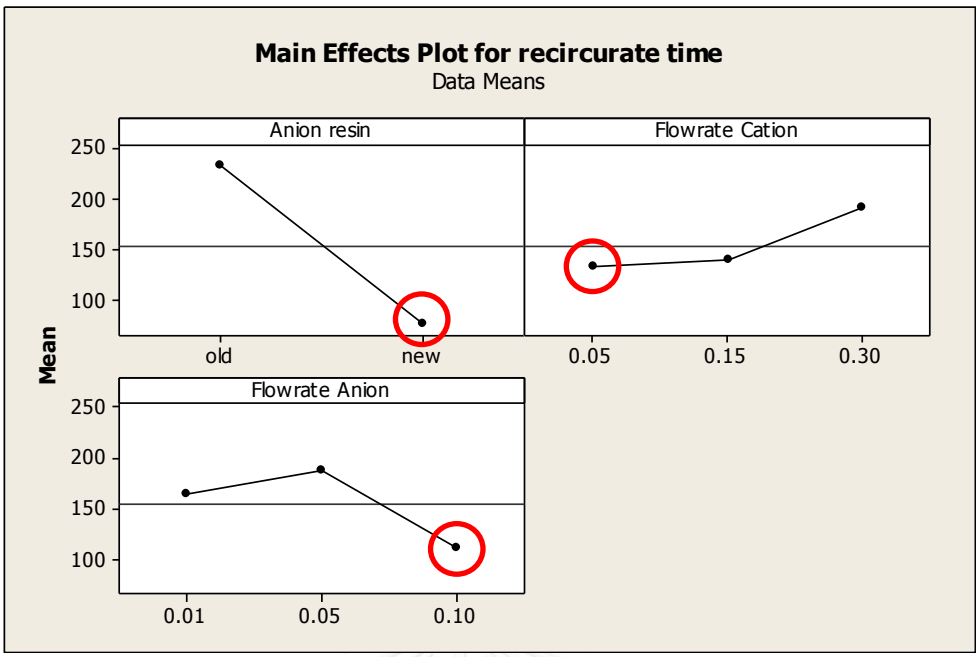
S = 15.3206 R-Sq = 98.64% R-Sq(adj) = 97.36%

รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน

จากรูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินพิจารณาที่ค่า P-value หากมีค่าน้อยกว่า 0.05 จะสรุปได้ว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากรูปจะเห็นได้ว่า

1. มีผลกระทบจากปัจจัยหลัก ทั้ง 3 ปัจจัย A B และ C คือเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.0005 ซึ่งน้อยกว่าค่า α 0.05 แสดงว่าปัจจัยหลักมีผลกระทบต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
2. มีผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยได้แก่ปัจจัย AB มีค่า P-Value เท่ากับ 0.001 ปัจจัย AC มีค่า P-Value เท่ากับ 0.001 และปัจจัย BC มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.0005 ซึ่งน้อยกว่าค่า α 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยมีผลกระทบต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
3. มีผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย คือปัจจัย A B และ C มีค่า P-Value เท่ากับ 0.030 ซึ่งน้อยกว่าค่า α 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วม 3 ปัจจัยมีผลกระทบต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

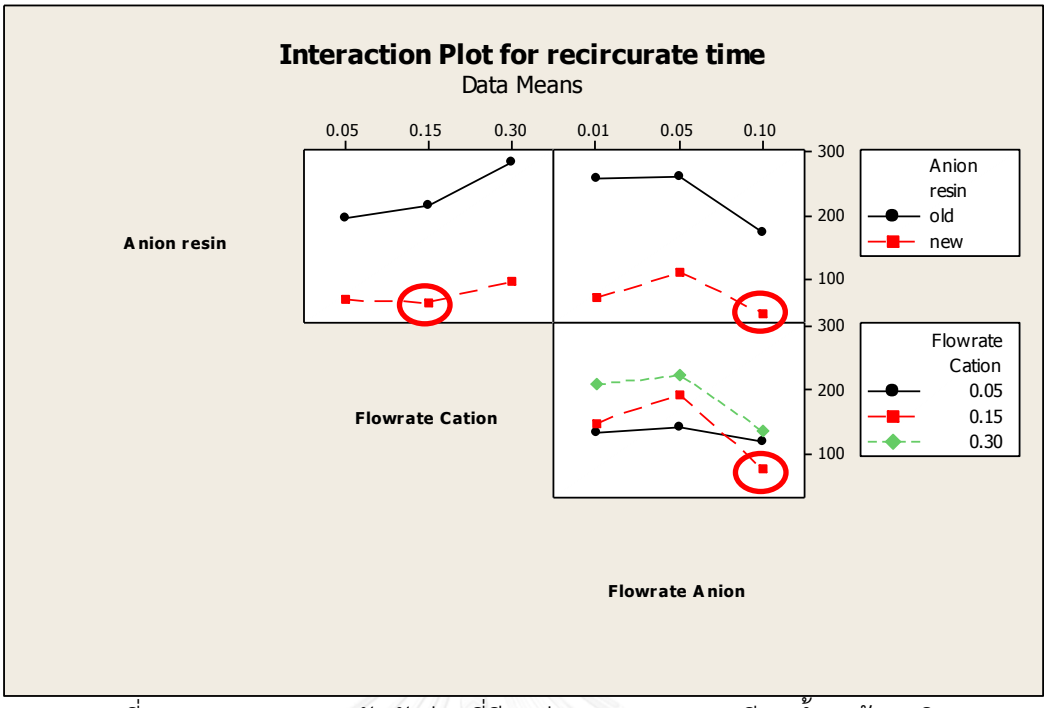
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 6.5 ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน

จากรูปที่ 6.5 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อตัวแปรตอบสนองโดยใช้โปรแกรม Minitab จะเห็นได้ว่าจากผลการทดลองปัจจัยหลักมีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน โดยเรซินประจุลบเรซินใหม่ใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยกว่าเรซินเก่า อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation ที่ระดับ 0.05 ลิตรต่อวินาที ให้ค่าน้อยที่สุดและใกล้เคียงกับที่อัตราเร็ว 0.15 ลิตรต่อวินาที และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion ที่ระดับ 0.10 ลิตรต่อวินาทีใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 6.6 ผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน

จากรูปที่ 6.6 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจากผลวิเคราห์ทางสถิติพบว่ามีผลกระทบของปัจจัยร่วมทั้ง 2 และ 3 ปัจจัยทุกตัวแปร โดยจากรูปที่ 6.6 สรุปได้ดังนี้

1. ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยเรซินประจุลบ และอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Cation ที่ระดับ เรซินใหม่และมีอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Cation เท่ากับ 0.15 ลิตรต่อนาทีให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุด
2. ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยเรซินประจุลบ และอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Anion ที่ระดับ เรซินใหม่และมีอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Anion เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาทีให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุด
3. ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Cation และอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Anion ที่ระดับอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Cation เท่ากับ 0.15 ลิตรต่อนาที และอัตราเร็วในการล้างช้าที่ Anion เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาทีให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุด

ตารางที่ 6.3 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า	ระดับที่เหมาะสม	หน่วย
1	เรซินประจุลบ	ใหม่	-
2	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation	0.15	ลิตรต่อนาที
3	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion	0.10	ลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 ปัจจัย สรุปได้ว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุดคือ เรซินประจุลบเรซินใหม่ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation เท่ากับ 0.15 ลิตรต่อนาที และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในตารางที่ 6.3

6.9 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริงมี 3 ปัจจัยได้แก่เรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation ในขั้นตอนนี้ทำการทดลองหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุด โดยทำการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย 8 ระดับ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 36 การทดลอง จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทั้งหมดมีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างมีนัยสำคัญ และมีผลกระทบของปัจจัยร่วมทั้ง 2 และ 3 ปัจจัย โดยระดับของปัจจัยที่เหมาะสมคือ เรซินประจุลบเรซินใหม่ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation 0.15 ลิตรต่อนาที และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion 0.10 ลิตรต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

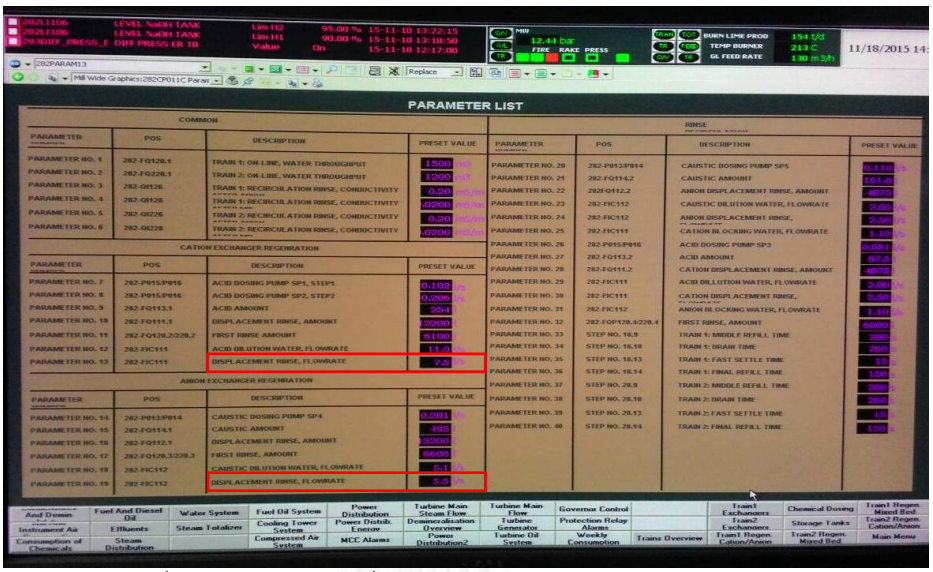
บทที่ 7
ระยะควบคุมกระบวนการ (Control Phase)

7.1 บทนำ

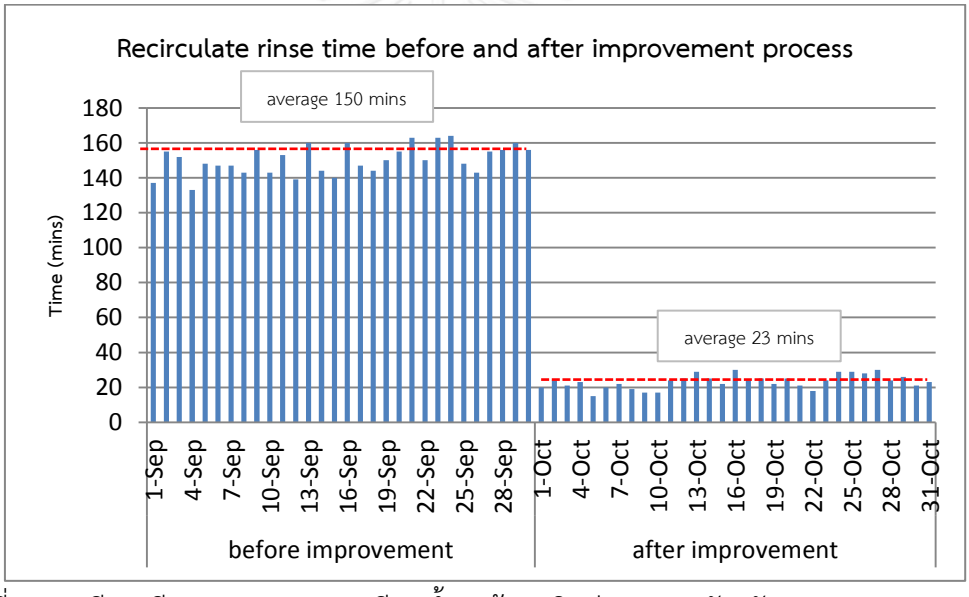
การควบคุมกระบวนการผลิตเป็นขั้นตอนสุดท้ายของซิกซ์ ซิกมา ในขั้นตอนนี้เป็นการนำแนวทางที่ใช้ในการแก้ปัญหาโดยนำระดับของปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในระดับปฏิบัติการมาทดลองจริงในกระบวนการผลิตระดับโรงงานเพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ผลหลังปรับปรุง พร้อมทั้งมีแนวทางในการควบคุมการปฏิบัติงานให้กระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุเป็นไปตามแนวทางที่กำหนดไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนานเกิดขึ้นอีก

7.2 ข้อมูลหลังปรับปรุงกระบวนการผลิต

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำระดับของปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่เหมาะสมตามที่กำหนดไว้มาปฏิบัติจริงในกระบวนการผลิต โดยเปลี่ยนเรซินประจุลบเป็นเรซินใหม่ และปรับอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation และ Anion ที่ห้องควบคุมระบบการผลิตอัตโนมัติ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ Displacement Rinse, Flowrate ที่ Cation เป็น 7.5 ลิตรต่อวินาที และ Displacement Rinse, Flowrate ที่ Anion เป็น 5.5 ลิตรต่อวินาทีที่หน้าจอควบคุมกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 7.1 เก็บข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินหลังปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุเป็นเวลา 30 วันดังแสดงในรูปที่ 7.2 เปรียบเทียบกับระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ พบว่าระยะเวลาลดลง 85% จาก 150 นาที ลดเหลือ 23 นาที สามารถเพิ่มการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้ 10,780 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็นมูลค่า 1,078,049 บาทต่อเดือน สรุปการปรับระดับของปัจจัยที่เหมาะสมและผลที่ได้จากการทดสอบในระดับโรงงานแสดงดังตารางที่ 7.1



รูปที่ 7.1 พารามิเตอร์ที่ปรับค่าหน้าจอควบคุมกระบวนการผลิต



รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการผลิต

ตารางที่ 7.1 ผลเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ

หัวข้อการปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
เรซินประจุลบ	เก่า	ใหม่
อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation (ลิตร/นาที)	0.22	0.15
อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion (ลิตร/นาที)	0.05	0.10
ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (นาที)	150	23
ผลผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ลูกบาศก์เมตร)	72,246	83,026

7.3 แนวทางการควบคุมระดับของปัจจัย

จากผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตทำให้ใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินลดลง และผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้มากขึ้น จึงมีแนวทางการควบคุมกระบวนการผลิตให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปตามที่ได้ศึกษาแล้ว ซึ่งปัจจัยที่ต้องควบคุมได้แก่ เรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation

7.3.1 เรซินประจุลบ

เรซินประจุลบที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้แก่ เรซินชนิดด่างอ่อน (Weak basic anionic resin, WBR) และเรซินชนิดด่างแก่ (Strong basic anionic resin, SBR) จากการทดลองเปลี่ยนเรซินประจุลบทั้ง 2 ชนิดจากเรซินเดิมที่ใช้งานปัจจุบันเป็นเรซินใหม่ ผลการทดลองยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนเรซินประจุลบเป็นเรซินใหม่มีผลให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลาน้อยลง การรักษาให้ใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยต้องเปลี่ยนเรซินประจุลบเป็นเรซินใหม่ จึงกำหนดให้มีการเปลี่ยนเรซินประจุลบในแผนการซ่อมบำรุงเดือนตุลาคม 2558 ที่ถัง Anion Exchanger

7.3.2 อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation

อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation เป็นปัจจัยที่สามารถปรับตั้งค่าที่ต้องการได้ โดยตั้งค่าที่ต้องการควบคุมที่ห้องควบคุมระบบปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติ (Distributed Control System ; DCS) ที่หน้าจอ Parameter List โดยปรับตั้งค่าของ Cation exchanger regeneration ที่พารามิเตอร์ Displacement rinse, flow rate จาก 11.0 ลิตรต่อวินาที เป็น 7.5 ลิตรต่อวินาที โดยมีแนวทางในการกำหนดให้พนักงานทุกคนปฏิบัติดังนี้

1. จัดทำคู่มือการควบคุมพารามิเตอร์ Displacement rinse, flow rate ของ Cation exchanger regeneration
2. พนักงานควบคุมการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ก่อนกระบวนการฟื้นฟูเรซินทุกครั้ง
3. จัดฝึกอบรมพนักงานให้เข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญ

7.3.3 อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion

อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion เป็นปัจจัยที่สามารถปรับตั้งค่าที่ต้องการได้ โดยตั้งค่าที่ต้องการควบคุมที่ห้องควบคุมระบบปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติ (Distributed Control System

; DCS) ที่หน้าจอ Parameter List โดยปรับตั้งค่าของ Anion exchanger regeneration ที่พารามิเตอร์ Displacement rinse, flow rate จาก 2.7 ลิตรต่อวินาที เป็น 5.5 ลิตรต่อวินาที โดยมีแนวทางในการกำหนดให้พนักงานทุกคนปฏิบัติดังนี้

1. จัดทำคู่มือการควบคุมพารามิเตอร์ Displacement rinse, flow rate ของ Anion exchanger regeneration
2. พนักงานควบคุมการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ก่อนกระบวนการฟื้นฟูเรซินทุกครั้ง
3. จัดฝึกอบรมพนักงานให้เข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญ

7.4 สรุประยะการควบคุมกระบวนการผลิต

จากการดำเนินงานนำแนวทางที่ใช้ในการแก้ปัญหาไปปฏิบัติจริงในกระบวนการผลิต โดยนำระดับของปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่เหมาะสมตามที่กำหนดไว้มาปฏิบัติจริงในกระบวนการผลิตเก็บข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเป็นเวลา 30 วัน พบว่าระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในการฟื้นฟูเรซินหลังการปรับปรุงมีค่าเฉลี่ย 23 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินก่อนปรับปรุง จะเห็นได้ว่ามีระยะเวลาลดลง 85% จาก 150 นาที ลดเหลือ 23 นาที สามารถเพิ่มการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้เพิ่มขึ้น 10,780 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็นมูลค่า 1,078,049 บาทต่อเดือน พร้อมทั้งมีแนวทางในการควบคุมการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุให้ใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยต่อไป โดยมีแผนกำหนดการเปลี่ยนเรซินประจุลบ จัดทำคู่มือการปฏิบัติงานและจัดฝึกอบรมพนักงานให้ตระหนักและเข้าใจถึงความสำคัญของการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้

บทที่ 8
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางแนวคิดซิกซ์ ซิกมา ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอนได้แก่ ระยะนิยามปัญหา ระยะตรวจวัดปัญหา ระยะวิเคราะห์ปัญหา ระยะปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และระยะควบคุมกระบวนการ มาประยุกต์ใช้ในการลดระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

จากการดำเนินงานตามขั้นตอนซิกซ์ ซิกมาทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินคือ เรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation และ Anion ซึ่งจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล พบว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุดคือ เรซินประจุลบเรซินใหม่ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation 0.15 ลิตรต่อนาที และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion 0.10 ลิตรต่อนาที จากการเก็บข้อมูลหลังปรับปรุงกระบวนการผลิตพบว่า มีระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินลดลง 85% จาก 150 นาที เหลือ 23 นาที ผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้เพิ่มมากขึ้น 10,780 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็นมูลค่า 1,078,049 บาทต่อเดือน โดยบทสรุปในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

8.2 บทสรุประยะนิยามปัญหา

ขั้นตอนนิยามปัญหา ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตและปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา กำหนดปัญหาและขอบเขตในงานวิจัยคือปัจจุบันพบปัญหาคุณภาพน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินมีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำที่ออกจากถัง Anion สูงเกิน 2.0 μS/cm ทำให้ใช้เวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเป็นระยะเวลานานมากขึ้น จากนั้นรวบรวมข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินตั้งแต่เดือนมกราคม 2557 ถึงเดือนกันยายน 2558 ดังนั้นจุดประสงค์ในงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาปัญหาที่เกี่ยวกับคุณภาพของน้ำที่ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเพื่อลดระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

8.3 บทสรุประยะตรวจวัดปัญหา

ระยะการตรวจวัดปัญหาเป็นระยะในการหาสาเหตุของปัญหา เริ่มด้วยการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัด ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งระบบการวัดเป็น 2 กลุ่มคือ การวิเคราะห์

ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต ได้แก่ ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน และเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาได้รับการรับรองระบบคุณภาพ ISO 9001 ทำให้ระบบการวัดของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตมีความน่าเชื่อถือ ยอมรับได้ และระบบการวัดค่าซิลิกาไดออกไซด์พบว่ามีความผันแปรจากระบบการวัดเทียบกับความผันแปรจากลักษณะตัวอย่าง (%SV หรือ P/TV) คิดเป็น 4.34% ซึ่งน้อยกว่า 10% อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงสรุปว่าระบบการวัดนี้มีความแม่นยำและความผันแปรอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากนั้นระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าโดยวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ทำให้ใช้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินนาน โดยใช้แผนภูมิก้างปลาทำให้ได้ปัจจัยเริ่มต้นทั้งหมด 28 ปัจจัย จากนั้นนำปัจจัยที่ได้มาคัดกรองปัจจัยด้วยตารางแสดงเหตุและผลโดยการระดมสมองเพื่อให้คะแนนตามลำดับความสำคัญ ทำให้เหลือปัจจัย 9 ปัจจัย และนำปัจจัยที่ได้คัดกรองแล้วมาวิเคราะห์ต่อด้วยลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) เรียงลำดับความสำคัญจากคะแนน RPN ทำให้ได้ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน 5 ปัจจัย ได้แก่ ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation

8.4 บทสรุประยะวิเคราะห์ปัญหา

ระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา นำปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองด้วยเครื่องมือทางสถิติต่างๆในระยะตรวจวัดปัญหามาหาสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง โดยการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยด้วยการทำการทดลองแบบ 2^{k-1} factorial design เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อระยะเวลาการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริง โดยมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 5 ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จึงมีระดับทั้งหมด 10 ระดับ ทำการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง จากผลการทดลองพบว่ามี 3 ปัจจัยได้แก่ ความเสื่อมสภาพของเรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation ที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินที่แท้จริงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

8.5 บทสรุประยะปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างแท้จริงมี 3 ปัจจัยได้แก่เรซินประจุลบ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่

Cation ในขั้นตอนนี้ทำการทดลองหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินน้อยที่สุด โดยทำการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย 8 ระดับ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 36 การทดลอง จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทั้งหมดมีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอย่างมีนัยสำคัญ และมีผลกระทบของปัจจัยร่วมทั้ง 2 และ 3 ปัจจัย โดยระดับของปัจจัยที่เหมาะสมคือ เรซินประจุลบเรซินใหม่ อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Cation 0.15 ลิตรต่อนาที และอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ Anion 0.10 ลิตรต่อนาที

8.6 บทสรุประยะควบคุมกระบวนการผลิต

ระยะติดตามควบคุมกระบวนการผลิต เป็นระยะสุดท้ายในขั้นตอนการดำเนินงานซิกซ์ ซิกมา โดยนำระดับของปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในระดับปฏิบัติการมาทดลองจริงในกระบวนการผลิตระดับโรงงานเพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ผลหลังปรับปรุง เก็บข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินเป็นเวลา 30 วัน พบว่าระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินหลังปรับปรุงกระบวนการมีระยะเวลาลดลง 85% จาก 150 นาที ลดเหลือ 23 นาที สามารถเพิ่มการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้เพิ่มขึ้น 10,780 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็นมูลค่า 1,078,049 บาทต่อเดือน และมีมาตรการในการควบคุมให้ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินอยู่ในระดับต่ำต่อไป มีแนวทางในการควบคุมระดับของปัจจัย โดยจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานและจัดฝึกอบรมพนักงานให้ตระหนักและเข้าใจถึงความสำคัญของการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้

8.7 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย

ข้อจำกัดและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. เนื่องจากปัจจัยที่สนใจศึกษาคือเรซินประจุลบเรซินเก่าและเรซินใหม่ ซึ่งในการทดลองเปลี่ยนเรซินสลับไปมาเป็นเรซินเก่าและเรซินใหม่ในระดับโรงงานใช้ระยะเวลานานและสามารถทำได้ในช่วงหยุดซ่อมบำรุงเท่านั้น จึงจำลองกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุในระดับปฏิบัติการเพื่อให้สามารถเปลี่ยนระดับของปัจจัยในการทดลองได้
2. การเก็บข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ อาจได้ข้อมูลระยะเวลาที่คลาดเคลื่อนจากกระบวนการผลิตจริงเล็กน้อย เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้าออนไลน์จึงใช้วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าตัวอย่างน้ำทุก 10-30 นาที

8.8 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในงานวิจัยมีดังนี้

1. ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ซึ่งส่งผลต่อผลผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุที่ผลิตได้ หากมีการศึกษาถึงปัจจัยอื่นที่ทำให้ผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุได้มากขึ้น เช่น กระบวนการฟื้นฟูเรซิน คุณภาพน้ำประปา จะเป็นประโยชน์มากขึ้น
2. ผลที่ได้จากการทดลองสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาลดระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินในกระบวนการผลิตน้ำที่ใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

AIAG, A. (2002). "Measurement systems analysis (MSA)." Reference Manual, Third Edition, The Automotive Industries Action Group, Troy.

Banuelas Coronado, R. and J. Antony (2002). "Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organisations." The TQM magazine **14**(2): 92-99.

Cheng, W., et al. (2014). Application of Six Sigma in oil and gas industry: Converting operation data into business value for process prediction and quality control. Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2014 IEEE International Conference on, IEEE.

Cherry, J. and S. Seshadri (2000). "Six Sigma: using statistics to reduce process variability and costs in radiology." Radiology Management **22**(6): 42-49.

Chou, Y.-m. and D. Owen (1989). "On the distributions of the estimated process capability indices." Communications in Statistics-Theory and Methods **18**(12): 4549-4560.

Harry, M. and R. Schroeder (2006). Six sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations, Broadway Business.

Lindfors, M. (1997). Operation Manual Demineralization Plant.

Meng, L., et al. (2011). Application of six Sigma method in improving the quality of box parts. Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference on, IEEE.

Montgomery, D. C. (2008). Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons.

Montgomery, D. C. and G. C. Runger (2010). Applied statistics and probability for engineers, John Wiley & Sons.

Peters, C. R. (1982). "Fundamentals of Demineralization." National Association of Corrosion Engineers.

Schroeder, R. G., et al. (2008). "Six Sigma: Definition and underlying theory." Journal of operations Management **26**(4): 536-554.

เจนจิวัฒนกุล, ว. (2554). การลดของเสียในกระบวนการพิมพ์พลาสติกโดยแนวทางซิกซ์ ซิกมา. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: 103.

ชุติมา, ป. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ตัณฑุลเวศม์, ม. (2542). วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทองศรีพงษ์, ภ. (2550). การลดของเสียในกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาโดยใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา. วิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: 238.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปานอำไพ, ป. (2553). การลดของเสียผลิตภัณฑ์คอยล์เย็นในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยการประยุกต์ใช้แนวทางของซิกซ์ ซิกมา (DMAIC). ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: 195.

พัทธิกุล, ช. (2552). การลดของคืนจากการส่งมองฐานรองรองมอเตอร์โดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา. วิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: 198.

โรจนโรวรรณ, น. (2557). การปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา.

หงสพันธ์, อ. (2553). การลดข้อบกพร่องในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถยนต์โดยแนวทางซิกซ์ ซิกมา. วิศวอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต: 152.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
ข้อมูลระยะนิยามปัญหา

ตาราง ก.1 ข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน
ตาราง ก.2 ข้อมูลปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ
ตาราง ก.3 ข้อมูลปริมาณการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุจากภายนอก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.1 ข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน

เดือน	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (นาที)	เดือน	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (นาที)
มกราคม 2557	10	มกราคม 2558	97
กุมภาพันธ์ 2557	15	กุมภาพันธ์ 2558	106
มีนาคม 2557	20	มีนาคม 2558	103
เมษายน 2557	14	เมษายน 2558	110
พฤษภาคม 2557	36	พฤษภาคม 2558	100
มิถุนายน 2557	55	มิถุนายน 2558	110
กรกฎาคม 2557	59	กรกฎาคม 2558	119
สิงหาคม 2557	70	สิงหาคม 2558	130
กันยายน 2557	72	กันยายน 2558	150
ตุลาคม 2557	90		
พฤศจิกายน 2557	87		
ธันวาคม 2557	92		

ตาราง ก.2 ข้อมูลปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

เดือน	ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ลูกบาศก์เมตร)	เดือน	ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ลูกบาศก์เมตร)
มกราคม 2557	88,660	มกราคม 2558	77,606
กุมภาพันธ์ 2557	87,922	กุมภาพันธ์ 2558	46,290
มีนาคม 2557	87,199	มีนาคม 2558	76,962
เมษายน 2557	88,069	เมษายน 2558	76,228
พฤษภาคม 2557	84,976	พฤษภาคม 2558	77,283
มิถุนายน 2557	82,504	มิถุนายน 2558	76,228

ตาราง ก.2 ข้อมูลปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ต่อ)

เดือน	ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ลูกบาศก์เมตร)	เดือน	ปริมาณการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ลูกบาศก์เมตร)
กรกฎาคม 2557	47,742	กรกฎาคม 2558	75,308
สิงหาคม 2557	80,671	สิงหาคม 2558	74,220
กันยายน 2557	80,434	กันยายน 2558	72,246
ตุลาคม 2557	78,373		
พฤศจิกายน 2557	78,708		
ธันวาคม 2557	78,152		

หมายเหตุ: เดือนกรกฎาคม 2557 และเดือนกุมภาพันธ์ 2558 หยุดซ่อมบำรุงประจำปี

ตาราง ก.3 ข้อมูลปริมาณการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุจากภายนอก

เดือน	ปริมาณการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ลูกบาศก์เมตร)	เดือน	ปริมาณการซื้อน้ำปราศจากแร่ธาตุ (ลูกบาศก์เมตร)
มกราคม 2557	3,340	มกราคม 2558	18,244
กุมภาพันธ์ 2557	3,359	กุมภาพันธ์ 2558	19,227
มีนาคม 2557	6,346	มีนาคม 2558	14,010
เมษายน 2557	6,747	เมษายน 2558	17,126
พฤษภาคม 2557	11,779	พฤษภาคม 2558	19,250
มิถุนายน 2557	15,986	มิถุนายน 2558	19,772
กรกฎาคม 2557	13,075	กรกฎาคม 2558	22,692
สิงหาคม 2557	16,175	สิงหาคม 2558	25,780
กันยายน 2557	16,011	กันยายน 2558	23,754
ตุลาคม 2557	16,791		
พฤศจิกายน 2557	16,476		
ธันวาคม 2557	17,971		

ภาคผนวก ข
ค่าการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา

ตาราง ข.1 ผลการให้คะแนนตารางแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)
ตาราง ข.2 เกณฑ์การให้คะแนนตามระดับความรุนแรงของปัญหา (Serverity; S)
ตาราง ข.3 เกณฑ์การให้คะแนนตามความถี่ของสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา (Occurrence; O)
ตาราง ข.4 เกณฑ์การให้คะแนนระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหา (Detective; D)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.1 ผลการให้คะแนนตารางแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

Item	Area cause	Process Input		MGT	OPT 1	OPT 2	QC 1	QC 2	Brain storm
1	Man	พนักงานไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานการทำงาน	ไม่มีความรู้ความเข้าใจ	3	3	3	3	1	**3**
2			ไม่ได้รับการฝึกอบรม	3	1	1	3	1	**1**
3			ขาดประสบการณ์/ความชำนาญ	3	1	1	3	1	**1**
4	Material	เรซินประจุบวก	เสื่อมสภาพ	3	3	9	9	9	**9**
5			เม็ดแตก ไม่สมบูรณ์	3	1	3	3	3	**3**
6		เรซินประจุลบ	เสื่อมสภาพ	9	3	9	9	9	**9**
7			เม็ดแตก ไม่สมบูรณ์	3	3	3	3	3	**3**
8		คุณภาพน้ำ Mill		3	1	1	1	1	**1**
9		คุณภาพสารเคมี		3	1	3	1	3	**3**
10	Machine	Nozzle ชำรุด		3	0	3	3	1	**3**
11		วาล์วไม่สมบูรณ์ (Passing)		9	9	9	9	3	**9**
12		ไลน์ท่อชำรุด สารเคมีรั่วซึม		3	9	3	3	3	**3**
13	Method	การฟื้นฟูเรซิน	ปริมาณกรดซัลฟิวริกไม่เหมาะสม	3	9	3	1	3	**3**
14			ปริมาณด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่เหมาะสม	3	9	3	1	3	**3**
15			อัตราเร็วกรดซัลฟิวริกไม่เหมาะสม	1	3	3	3	9	**3**
16			อัตราเร็วด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่เหมาะสม	1	3	3	3	9	**3**
17		อัตราเร็วในการล้างเรซิน	อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation	9	9	9	9	3	**9**
18			อัตราเร็วในการล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion	9	9	9	9	3	**9**

ตารางที่ ข.1 ผลการให้คะแนนตารางแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) (ต่อ)

Item	Area cause	Process Input		MGT	OPT 1	OPT 2	QC 1	QC 2	Brain storm
19	Method	อัตราเร็วในการล้างเรซิน	อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	9	9	9	3	9	**9**
20			อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	9	9	9	3	9	**9**
21		น้ำล้างเรซิน	คุณภาพน้ำล้างเรซิน	3	9	3	1	3	**3**
22			ปริมาณน้ำล้างอย่างเร็วที่ถัง Cation	3	9	3	1	3	**3**
23			ปริมาณน้ำล้างอย่างเร็วที่ถัง Anion	3	9	3	1	3	**3**
24			ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Cation	9	9	3	1	9	**9**
25			ปริมาณน้ำล้างอย่างช้าที่ถัง Anion	9	9	3	1	9	**9**
26	Measurement	เครื่องมือวัด	ความถูกต้องแม่นยำ	3	3	3	3	3	**3**
27			ความถูกต้องวิธีการวัด การทดสอบ	3	9	3	3	3	**3**
28	Environment	อุณหภูมิ สภาพอากาศ		0	0	0	0	0	**0**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.2 เกณฑ์การให้คะแนนตามระดับความรุนแรงของปัญหา (Serverity; S)

ผลกระทบ	ความร้ายแรงของผลกระทบ	ระดับ
ความเสียหายร้ายแรงในกระบวนการผลิตโดยไม่มีสัญญาณเตือน	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 150 นาที โดยไม่มีสัญญาณเตือน	10
ความเสียหายร้ายแรงในกระบวนการผลิตโดยมีสัญญาณเตือนก่อน	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 120 แต่ไม่เกิน 150 นาที โดยมีสัญญาณเตือนก่อน	9
สูงมาก	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 100 แต่ไม่เกิน 120 นาที	8
สูง	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 80 แต่ไม่เกิน 100 นาที	7
พอสมควร	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 60 แต่ไม่เกิน 80 นาที	6
ต่ำ	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 40 แต่ไม่เกิน 60 นาที	5
ต่ำมาก	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 30 แต่ไม่เกิน 40 นาที	4
น้อย	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 20 แต่ไม่เกิน 30 นาที	3
น้อยมาก	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลามากกว่า 10 แต่ไม่เกิน 20 นาที	2
ไม่มีผลกระทบ	ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที	1

ตารางที่ ข.3 เกณฑ์การให้คะแนนตามความถี่ของสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา (Occurrence; O)

ความน่าจะเป็นของการเกิดปัญหา	ระดับความเป็นไปได้ของการใช้ระยะเวลานาน	ระดับ
สูงมาก : ทำให้เกิดปัญหาทุกครั้ง ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้	1 ใน 1 (100%)	10
สูงมาก : ทำให้เกิดปัญหาบ่อยครั้งมาก	1 ใน 1.25 (80%)	9
สูง : ทำให้เกิดปัญหาบ่อยครั้ง	1 ใน 2 (50%)	8
สูง : ทำให้เกิดปัญหาในบางครั้ง	1 ใน 4 (25%)	7
พอสมควร	1 ใน 5 (20%)	6
พอสมควร	1 ใน 10 (10%)	5
พอสมควร	1 ใน 25 (4%)	4
ต่ำ	1 ใน 50 (0.2%)	3
ต่ำมาก	1 ใน 100 (0.1%)	2
น้อยมาก แทบจะไม่เกิดปัญหา	1 ใน 120 (0.0083%)	1

ตารางที่ ข.4 เกณฑ์การให้คะแนนระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหา (Detective; D)

การตรวจจับ	แนวโน้มในการตรวจพบสาเหตุของความเสียหาย	ระดับ
เกือบจะเป็นไปไม่ได้	ยังไม่มีมาตรการป้องกันความเสียหาย	10
ห่างไกลมาก	การควบคุมนี้ ยังห่างไกลมากที่จะป้องกันความเสียหาย	9
ห่างไกล	การควบคุมนี้ ยังห่างไกลที่จะป้องกันความเสียหาย	8
ต่ำมาก	การควบคุมนี้ ยังต่ำมากที่จะป้องกันความเสียหาย	7
ต่ำ	การควบคุมนี้ ยังต่ำที่จะป้องกันความเสียหาย	6
ปานกลาง	การควบคุมนี้ พอสมควรที่จะป้องกันความเสียหาย	5
ค่อนข้างสูง	การควบคุมนี้ ค่อนข้างสูงพอที่จะป้องกันความเสียหาย	4
สูง	การควบคุมนี้ สูงพอที่จะป้องกันความเสียหาย	3
สูงมาก	การควบคุมนี้ สูงมากพอที่จะป้องกันความเสียหาย	2
เกือบแน่นอน	การควบคุมนี้เกือบแน่นอนแล้วที่จะป้องกันความเสียหาย	1

ภาคผนวก ค
การควบคุมการผลิต

ตาราง ค.1 ข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินก่อนและหลังปรับปรุง
ตาราง ค.2 คู่มือการปฏิบัติงานการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุบวก
ตาราง ค.3 คู่มือการปฏิบัติงานการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุลบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.1 ข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินก่อนและหลังปรับปรุง

ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง	
วันที่	**ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (นาที)**	**วันที่**	**ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (นาที)**
1-ก.ย.	137	1-ต.ค.	20
2-ก.ย.	155	2-ต.ค.	24
3-ก.ย.	152	3-ต.ค.	21
4-ก.ย.	133	4-ต.ค.	23
5-ก.ย.	148	5-ต.ค.	15
6-ก.ย.	147	6-ต.ค.	20
7-ก.ย.	147	7-ต.ค.	22
8-ก.ย.	143	8-ต.ค.	19
9-ก.ย.	156	9-ต.ค.	17
10-ก.ย.	143	10-ต.ค.	17
11-ก.ย.	153	11-ต.ค.	24
12-ก.ย.	139	12-ต.ค.	25
13-ก.ย.	160	13-ต.ค.	29
14-ก.ย.	144	14-ต.ค.	25
15-ก.ย.	140	15-ต.ค.	22
16-ก.ย.	160	16-ต.ค.	30
17-ก.ย.	147	17-ต.ค.	24
18-ก.ย.	144	18-ต.ค.	25
19-ก.ย.	150	19-ต.ค.	22
20-ก.ย.	155	20-ต.ค.	25
21-ก.ย.	163	21-ต.ค.	21
22-ก.ย.	150	22-ต.ค.	18
23-ก.ย.	163	23-ต.ค.	24

ตาราง ค.1 ข้อมูลระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซินก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ)

ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง	
วันที่	**ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (นาที)**	**วันที่**	**ระยะเวลาหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน (นาที)**
24-ก.ย.	164	24-ต.ค.	29
25-ก.ย.	148	25-ต.ค.	29
26-ก.ย.	143	26-ต.ค.	28
27-ก.ย.	155	27-ต.ค.	30
28-ก.ย.	156	28-ต.ค.	24
29-ก.ย.	160	29-ต.ค.	26
30-ก.ย.	156	30-ต.ค.	21
		31-ต.ค.	23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.2 คู่มือการปฏิบัติงานการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุบวก

คู่มือการปฏิบัติงาน

เรื่อง การควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุบวก

ขอบเขตและที่มา

คู่มือการปฏิบัติงานนี้ใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ ในขั้นตอนการล้างอย่างช้า (Displacement rinse) ที่ถังเรซินประจุบวก เนื่องจากการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าให้เหมาะสมมีความสำคัญต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ซึ่งมีผลต่อกำลังการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

เอกสารอ้างอิง

Operation Manual Demineralized water plant

อุปกรณ์การทำงาน

ระบบควบคุมการปฏิบัติการ DCS

ขั้นตอนการทำงาน

1. ควบคุมค่าพารามิเตอร์อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุบวก (Displacement rinse, flow rate at Cation exchanger regeneration) ไว้ที่ 7.5 ลิตรต่อวินาที
2. ก่อนเริ่มกระบวนการฟื้นฟูเรซิน ตรวจสอบพารามิเตอร์ในการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุบวกให้ตรงกับที่ตั้งค่าไว้ในคู่มือการปฏิบัติงาน
3. ขณะกระบวนการล้างให้พนักงานบันทึกค่าอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าและค่าความเบี่ยงเบนของอัตราเร็วที่ควบคุมในบันทึก Log sheet ทุกครั้ง

หมายเหตุ

หากต้องการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าไว้ที่ระบบปฏิบัติการ ให้พนักงานที่ปฏิบัติงานควบคุมการผลิตแจ้งหัวหน้างาน (Shift Manager) ก่อนทุกครั้ง

อุปกรณ์ความปลอดภัย

ไม่มี

ข้อควรระวัง

ไม่มี

บันทึก

เอกสาร Log sheet Demineralized water plant

Issued by:	Document. No:	Edition no.
Responsible for:	Issued date:	Page no. 1/1
Approved by:		

ตาราง ค.3 คู่มือการปฏิบัติงานการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุลบ

คู่มือการปฏิบัติงาน

เรื่อง การควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุลบ

ขอบเขตและที่มา

คู่มือการปฏิบัติงานนี้ใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ ในขั้นตอนการล้างอย่างช้า (Displacement rinse) ที่ถังเรซินประจุลบ เนื่องจากการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าให้เหมาะสมมีความสำคัญต่อระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำชะล้างเรซิน ซึ่งมีผลต่อกำลังการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ

เอกสารอ้างอิง

Operation Manual Demineralized water plant

อุปกรณ์การทำงาน

ระบบควบคุมการปฏิบัติการ DCS

ขั้นตอนการทำงาน

1. ควบคุมค่าพารามิเตอร์อัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุลบ (Displacement rinse, flow rate at Anion exchanger regeneration) ไว้ที่ 5.5 ลิตรต่อนาที
2. ก่อนเริ่มกระบวนการฟื้นฟูเรซิน ตรวจสอบพารามิเตอร์ในการควบคุมอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าที่ถังเรซินประจุลบให้ตรงกับที่ตั้งค่าไว้ในคู่มือการปฏิบัติงาน
3. ขณะกระบวนการล้างให้พนักงานบันทึกค่าอัตราเร็วในการล้างอย่างช้าและค่าความเบี่ยงเบนของอัตราเร็วที่ควบคุมในบันทึก Log sheet ทุกครั้ง

หมายเหตุ

หากต้องการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าไว้ที่ระบบปฏิบัติการ ให้พนักงานที่ปฏิบัติงานควบคุมการผลิตแจ้งหัวหน้างาน (Shift Manager) ก่อนทุกครั้ง

อุปกรณ์ความปลอดภัย

ไม่มี

ข้อควรระวัง

ไม่มี

บันทึก

เอกสาร Log sheet Demineralized water plant

Issued by:	Document. No:	Edition no.
Responsible for:	Issued date:	Page no. 1/1
Approved by:		

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธิดารัตน์ ธัญญรักษ์ เกิดวันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2532 ที่จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2552 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งนักวิจัยในบริษัทแห่งหนึ่ง และในปี 2557 ได้เข้าศึกษาปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University