



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนในกระบวนการผลิต
น้ำประปา

Improvement Turbidity Removal Efficiency of Clarifier in Water Treatment Process

นามผู้วิจัย นายชัยวัฒน์ ชมสุวรรณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เลิศชัย ระตะนະอาพร, วศ.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา

Improvement Turbidity Removal Efficiency of Clarifier in Water Treatment Process

โดย

นายชัยวัฒน์ ชมสุวรรณ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2552

ชัยวัฒน์ ชมสุวรรณ 2552: การปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เลิศชัย ระตะนະอาพร, วศ.ม. 145 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนแบบมีชั้นสัดจ์ในกระบวนการผลิตน้ำประปาด้วยวิธีทางสถิติ ในส่วนแรกทำการศึกษหาปริมาณการใช้สารส้มในขั้นตอนการให้น้ำดิบตกตะกอน โดยการหาโมเดลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบ ได้แก่ ความขุ่น(Tur) ความเป็นกรด-ด่าง(pH) ความเป็นด่าง(Alk) และความกระด้าง(Har) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยสมการโมเดล จำนวน 3 รูปแบบ พบว่าความสัมพันธ์ของโมเดลที่มีเพียง 2 ตัวแปร จากความขุ่นและความเป็นด่าง สามารถใช้พยากรณ์ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมได้ดีกว่าวิธีจาร์เทสต์ สำหรับส่วนที่สองเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น ขั้นแรกทำการค้นหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดความขุ่น โดยวางแผนการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำหลังผ่านการตกตะกอน จากมากไปน้อย ได้แก่ ปริมาณสารส้ม อัตราการผลิต ความถี่การระบายตะกอน ระยะขนานน้ำในห้องสุญญากาศ เวลาในการปล่อยอากาศ ตามลำดับ

จากนั้นทำการวางแผนการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม ด้วยวิธีเซ็นทรัลคอมโพสิต ในช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU และ 45 – 60 NTU ที่อัตราการผลิตต่ำ พบว่า ค่าที่เหมาะสม คือ ปริมาณสารส้ม 24 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะขนานน้ำในห้องสุญญากาศ 0.40 และ 0.50 เมตร เวลาในการปล่อยอากาศ 11 และ 12 วินาที ความถี่การระบายตะกอน 400 และ 400 วินาที ตามลำดับ และที่อัตราการผลิตสูง พบว่า ค่าที่เหมาะสม คือ ปริมาณสารส้ม 27 และ 28 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะขนานน้ำในห้องสุญญากาศ 0.25 และ 0.38 เมตร เวลาในการปล่อยอากาศ 10 และ 11 วินาที ความถี่การระบายตะกอน 320 และ 320 วินาที ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้ตามแผน

Chaiwat Chomsuwan 2009: Improvement Turbidity Removal Efficiency of Clarifier in Water Treatment Process. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Lertchai Ratana-arporn, M.Eng. 145 pages.

This study was conducted to find out the statistical method to improve turbidity removal efficiency of sludge blanket clarifier in water treatment process. In first part, to calculate the quantity of alum dose used in coagulation – flocculation process by mathematic model of relation between optimum alum dose and water quality parameters as turbidity(Tur), pH(pH), alkalinity(Alk) and hardness(Har) by regression analysis equation in 3 models. It was found that relation of model had only 2 parameters as turbidity and alkalinity and can be predicted the optimum alum dose better than jar test. In second part, to study the suitable condition for turbidity removal. It was found in the first experiment by Taguchi method that factors effects to turbidity of water from clarified tank were alum dose, production rate, drain frequency, suction height, flush time, respectively.

Then next experiment was investigated the optimum condition by central composite design. In case of raw water turbidity were 25 – 40 NTU and 45 – 60 NTU. It was found that, at low production rate, the optimum value were alum dose 24 and 25 mg/l, suction height 0.40 and 0.50 meter, flush time 11 and 12 second, drain frequency 400 and 400 second, respectively. And at high production rate, it was found that the optimum value were alum dose 27 and 28 mg/l, suction height 0.25 and 0.38 meter, flush time 10 and 11 second, drain frequency 320 and 320 second, respectively. These values can be used in actual water treatment process.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.เลิศชัย ระตะนະอาพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้อำนวยการฝ่าย ผู้อำนวยการกอง หัวหน้าส่วนควบคุมการผลิตน้ำ หัวหน้าส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำ พนักงาน ลูกจ้าง ทุกคน ที่ได้แนะนำให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนพนักงานฝ่ายผลิตที่กรุณาให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่สาว ที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ชัยวัฒน์ ชมสุวรรณ

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	32
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
สรุป	89
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบ	96
ภาคผนวก ข แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้สารส้มกับ พารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบ	116
ภาคผนวก ค แสดงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความขุ่น	128
ภาคผนวก ง แสดงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เพื่อยืนยันผล	142
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	145

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ชนิด $L_8 2^7$	22
2	แสดงค่าข้อมูลเบื้องต้นของตัวแปรที่ทำการศึกษา	39
3	ผลการตรวจสอบลักษณะของข้อมูล AlumDose	40
4	แสดงจำนวนปัจจัยและระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองขั้นต้น	50
5	แสดงปัจจัยและระดับทั้งหมด ตามแผนการทดลองทางสถิติ แบบ $L_{16} 2^{15}$	52
6	ผลตอบสนองสำหรับค่า S/N Ratio ปัจจัยหลักและปัจจัยรวม (กรณีนี้ยิ่งกว่าดีกว่า: Smaller The Better)	53
7	แสดงระดับของปัจจัยที่อัตราการผลิตต่ำ สำหรับแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต	57
8	ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	58
9	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	59
10	Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	59
11	ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	60
12	การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	61
13	ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	64
14	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	66
15	Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	67
17	การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	68
18	แสดงระดับของปัจจัยที่อัตราการผลิตสูง สำหรับแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต	71
19	ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนอง แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	72
20	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25-40 NTU	74
21	Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิต สูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	74
22	ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	75
23	การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	76
24	ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวตอบสนอง แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	79
25	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	81
26	Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	81
27	ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	82
28	การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
29	ค่าประมาณปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในแต่ละช่วงความขุ่นน้ำดิบ	90
ตารางผนวกที่		
ก1	ข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบและปริมาณขนาดการใช้สารส้มที่เหมาะสม ปี 2549 – 2550	97
ก2	ข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบและปริมาณขนาดการใช้สารส้มที่เหมาะสม เดือน ม.ค. - ก.ค. 2551	111
ค1	แสดงข้อมูลผลการทดลองวิธีทาฐิ ออร์โททอแนลแอร์เรย์ชนิดแอล 16	129
ค2	แสดงข้อมูลผลการทดลอง CCD ที่ อัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 - 40 NTU	132
ค3	แสดงข้อมูลผลการทดลอง CCD ที่ อัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 - 60 NTU	135
ค4	แสดงข้อมูลผลการทดลอง CCD ที่ อัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 - 40 NTU	137
ค5	แสดงข้อมูลผลการทดลอง CCD ที่ อัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 - 60 NTU	140
ง1	แสดงข้อมูลผลการทดลองยืนยันผลครั้งที่ 1 ความขุ่นน้ำดิบ 27 - 40 NTU	143
ง2	แสดงข้อมูลผลการทดลองยืนยันผลครั้งที่ 2 ความขุ่นน้ำดิบ 36 - 49 NTU	144

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อุปกรณ์การทดลองจาร์เทสต์ (Jar Test)	8
2	แผนผังกรรมวิธีผลิตน้ำประปา	9
3	โครงสร้างถังตกตะกอนแบบ Pulsator Clarifier	11
4	แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การตกตะกอน	13
5	แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ	15
6	โครงสร้างการออกแบบของ 3 ² แฟคทอเรียล	17
7	แสดงส่วนประกอบของการออกแบบวิธีเช่นทรีลคอมโพสิตที่มี 2 ปัจจัย	18
8	แสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปกราฟ 3 มิติและเส้นโครงร่าง	19
9	ความหมายของสัญลักษณ์ตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์	22
10	กราฟเส้นตรงมาตรฐานของตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ L ₈ 2 ⁷	32
11	ขั้นตอนการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน	33
12	แผนภูมิเปรียบเทียบค่าปริมาณสารส้มที่ใช้ในระบบผลิตและสารส้มที่เหมาะสมกับค่าความขุ่นน้ำดิบ	33
13	แผนภูมิเหตุและผลวิเคราะห์หาสาเหตุที่ส่งผลต่อการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน	35
14	กราฟฮิสโตแกรมแสดงค่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสม	40
15	แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 1	42
16	แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 2	43
17	แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 3	45
18	แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 1 ที่ทำการปรับค่าความแตกต่างด้วยค่าคงที่ -1.8 แล้ว	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	กราฟเส้นตรงสำหรับการออกแบบการทดลองทางสถิติ ตาราง $L_{16} 2^{15}$ ที่นำมาพิจารณา	51
20	กราฟเส้นตรงกำหนดตำแหน่งของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ทำการศึกษา	51
21	กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมทั้งหมด 15 ปัจจัย ด้วยค่า S/N Ratios	55
22	กราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A กับ B	55
23	กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	62
24	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	62
25	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	63
26	กราฟ Response Optimization แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	64
27	กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	69
28	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	69
29	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	70
30	กราฟ Response Optimization แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	71
31	กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	77
33	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	78
34	กราฟ Response Optimization แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU	79
35	กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	84
36	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	84
37	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	85
38	กราฟ Response Optimization แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU	86
39	การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการในการยีนย่นผล ครั้งที่ 1	87
40	การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการในการยีนย่นผล ครั้งที่ 2	88
ภาพผนวกที่		
ข1	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของตัวแปร	117
ข2	แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย โมเดลที่ 1 จากโปรแกรม SPSS	118
ข3	แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย โมเดลที่ 2 จากโปรแกรม SPSS	121
ข4	แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย โมเดลที่ 3 จากโปรแกรม SPSS	125

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	ระดับนัยสำคัญ
บัฟเฟอร์	=	สารละลายกรดอ่อนหรือด่างอ่อนซึ่งสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในภาวะที่ได้รับกรดหรือด่างได้ ทำให้ pH เปลี่ยนแปลงไม่มาก
ลบ.ม./ วัน	=	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
Alum	=	อลูมิเนียมซัลเฟตหรือ สารส้ม
CCD	=	Central Composite Design แผนการออกแบบการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิต
Cp	=	ค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการ
Cpk	=	ค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการเมื่อพิจารณาตำแหน่งของค่าเฉลี่ยกระบวนการ
Cpm	=	ค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการเมื่อพิจารณาตำแหน่งของค่าเฉลี่ยกระบวนการกับค่าเป้าหมาย
Floc.	=	Flocculation กระบวนการทำให้อนุภาคในน้ำเกิดการจับตัวกัน จนมีขนาดใหญ่ขึ้น
mg / l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg / l as CaCO ₃	=	มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
mg / l as O ₂	=	มิลลิกรัมต่อลิตรของออกซิเจน
μ S / cm.	=	ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
NTU	=	หน่วยวัดค่าความขุ่นของน้ำและของเหลว (Nephelometric Turbidity Unit)
R ² adj	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ทำการปรับค่าแล้ว
S/N _s	=	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratios) กรณีน้อยกว่าดีกว่า
S/N _L	=	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratios) กรณีมากกว่าดีกว่า
S/N _T	=	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratios) กรณีเป้าหมายดีที่สุด
Surface Overflow	=	น้ำล้นผิว

การปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

Improvement Turbidity Removal Efficiency of Clarifier in Water Treatment Process

คำนำ

เนื่องจากปัจจุบัน แหล่งน้ำดิบที่เหมาะสมในการนำมาผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ ในการอุปโภค บริโภค มีอยู่อย่างจำกัด ทั้งปริมาณและคุณภาพก็มีความเสื่อมโทรมลง จึงทำให้มนุษย์จำเป็นต้องมี การปรับตัว และพัฒนาความสามารถในการบำบัดน้ำให้มีคุณภาพดี สะอาดและปลอดภัยก่อนที่จะ นำมาใช้ จึงเป็นที่มาของกรรมวิธีผลิตน้ำประปา ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการหลากหลายรูปแบบที่ได้รับการ พัฒนาโดยตลอด แต่วิธีการและรูปแบบเหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบจากแหล่งน้ำ ธรรมชาติผิวดินแต่ละแหล่ง โดยให้ความสำคัญสูงสุดกับความสะอาดและปลอดภัย แต่ปัจจัยทาง ด้านต้นทุนในการดำเนินงานก็เป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพราะในปัจจุบัน น้ำประปาเป็นสิ่ง จำเป็นในการดำเนินชีวิตประจำวันของประชาชนส่วนใหญ่อย่างขาดไม่ได้

การปรับปรุงสภาพน้ำดิบ โดยผ่านกระบวนการผลิตน้ำประปาที่ซับซ้อนจนมีคุณภาพน้ำ ตามเกณฑ์มาตรฐาน สะอาด ปลอดภัย สามารถเป็นน้ำดื่มได้นั้น กระบวนการต้องมีประสิทธิภาพ ในการผลิต โดยต้องเลือกแหล่งน้ำดิบ เลือกใช้วิธีการ เลือกใช้ชนิดของสารเคมี ปริมาณของ สารเคมี แหล่งพลังงาน บุคลากร ให้เป็นไปอย่างถูกต้องเหมาะสม ตลอดจนการควบคุมตรวจสอบ คุณภาพน้ำในแต่ละขั้นตอนต้องเชื่อถือได้ ถ้าสามารถดำเนินการได้ตามที่ต้องการจนเป็นน้ำประปา ด้วยวิธีการที่เหมาะสม และค่าใช้จ่ายไม่สูงเกินไป ย่อมทำให้ผู้ใช้น้ำประปาทุกคนมีความพึงพอใจ ในคุณภาพและราคา แต่ถ้าการผลิตน้ำประปาไม่มีประสิทธิภาพ คุณภาพไม่ได้มาตรฐานที่กำหนด หรือได้คุณภาพแต่มีปริมาณไม่เพียงพอกับความต้องการ ตลอดจนราคาสูงเกินไป ผู้ใช้น้ำโดยรวม ย่อมได้รับผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

จากกรณีดังกล่าว ทำให้โรงงานตัวอย่างที่ทำการศึกษามีนโยบายปรับปรุงให้การดำเนินงาน มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะความต้องการปรับปรุงให้กระบวนการผลิตน้ำ ประปาสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการของผู้ใช้น้ำที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จากการ

ใช้ในแต่ละช่วงเวลาระหว่างวัน ระหว่างฤดูกาล หรือกรณีมีข้อขัดข้องต่างๆ ทำให้ต้องปรับเปลี่ยน อัตราการผลิตบ่อยครั้ง และในบางครั้งต้องทำการผลิตมากกว่าปกติ ทำให้กระทบกับการควบคุม คุณภาพน้ำเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน รวมถึงการที่ต้องใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสูงกว่า เป้าหมายที่คาดการณ์ไว้

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานในส่วนขั้นตอนกรรมวิธีผลิตน้ำประปา ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการปรับปรุงการทำงานในส่วนของการหาปริมาณการใช้สารเคมีที่เหมาะสม ขั้นตอนการเติมสารเคมีจนทำให้เกิดการตกตะกอน เพื่อกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบใน อุปกรณ์ถังตกตะกอน เรียกว่า ขั้นตอนการตกตะกอน ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญหลักในการควบคุม คุณภาพน้ำและกำหนดประสิทธิภาพของถังตกตะกอน โดยหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ คุณภาพน้ำดิบกับปริมาณการใช้สารเคมีในการทำให้เกิดกระบวนการตกตะกอนที่เหมาะสม จากนั้น งานวิจัยจะทำการวางแผนการออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยและค่าระดับของปัจจัยมาเป็นค่า ควบคุมที่เหมาะสมในการทำงานของถังตกตะกอน และวิธีควบคุมให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพ ในการใช้งานจริง เพื่อรองรับสถานการณ์การผลิตต่างๆ ตลอดจนหาแนวทางการควบคุมการ ดำเนินงานภายหลังปรับปรุงได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ซึ่งประโยชน์ที่จะได้รับเมื่อทำการปรับปรุง คือสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า น้ำประปามีคุณภาพ ลดความสูญเสีย และทำให้องค์กรมีกำไรเพิ่มขึ้น

ข้อมูลทั่วไปและปัญหาของโรงงานที่ศึกษา

โรงงานที่ทำการศึกษาคือโรงงานผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่และทันสมัย ปัจจุบันมีกำลัง การผลิตสูงสุดถึง 1,200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และกำลังขยายกำลังการผลิตให้มากขึ้นเพื่อ รองรับกับความต้องการของผู้ใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้นอยู่ตลอดเวลา สามารถขยายได้สูงสุดถึงวันละ 3.2 ล้านลูกบาศก์เมตร ขณะนี้โรงงานรับน้ำดิบจากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดกาญจนบุรี ส่งมาตามคลอง ประปาที่ขุดสร้างขึ้น เพื่อนำมาผลิตเป็นน้ำประปา เพราะมีคุณภาพดีและมีปริมาณมากเพียงพอให้ใช้ ต่อไปได้ในอนาคต หลักเกณฑ์ในการผลิตน้ำต้องใช้เวลาเป็นชั่วโมงปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบและ กำจัดความขุ่นโดยการตกตะกอน จากนั้นผ่านกระบวนการกรองน้ำให้ใสขึ้น และฆ่าเชื้อโรคโดยใช้ คลอรีน เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำประปาเป็นไปตามมาตรฐานน้ำดื่ม

สภาพปัจจุบันโรงงานมีระบบการผลิตแบ่งเป็น 3 เฟส ในแต่ละเฟสสามารถผลิตน้ำประปา ได้สูงสุด 400,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีลำดับและขั้นตอนในกระบวนการผลิตเหมือนกัน

ทั้งหมด แต่มีความแตกต่างกันในส่วนอุปกรณ์การผลิตสำคัญคือ ถังตกตะกอน(Clarifiers) โดยในการผลิตเฟสที่ 1 และ 2 เป็นถังตกตะกอนแบบมีชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket Clarifier หรือ Pulsator Clarifier) รวม 4 หน่วยผลิต ส่วนในการผลิตเฟสที่ 3 เป็นถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนสลัดจ์ (Sludge Recirculation Clarifier) รวม 2 หน่วยผลิต โดยมีเกณฑ์ให้คุณภาพน้ำที่ผ่านการเติมสารเคมี และทำให้ตกตะกอนในถังมีค่าความขุ่นไม่เกิน 7 หน่วยความขุ่น(NTU) เท่ากันทั้งสองแบบ แต่จากปัญหาที่พบในการทำงานจริง ปรากฏว่าถังตกตะกอนแบบมีชั้นสลัดจ์มีการควบคุมให้เป็นไปตามเกณฑ์มีความยุ่งยากกว่า และต้องใช้สารเคมีมากกว่าถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนสลัดจ์ ทั้งที่ถังตกตะกอนแบบแรกใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยกว่า ซึ่งได้รับการพัฒนามาแล้ว

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบกับปริมาณการเติมสารเคมี เพื่อให้เกิดการตกตะกอนจนได้ความขุ่นที่เหมาะสมตามต้องการ
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขุ่นของน้ำหลังการตกตะกอนในระหว่างขั้นตอนการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่นน้ำดิบ และกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการควบคุมกระบวนการตกตะกอน
3. เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยลดปริมาณการใช้สารเคมีในกระบวนการตกตะกอนและลดความสูญเสียจากกระบวนการ โดยควบคุมค่าความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

การตรวจเอกสาร

พารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบที่วิเคราะห์

เกรียงศักดิ์ (2541) กล่าวว่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณภาพของแหล่งน้ำผิวดินที่เรียกว่า น้ำดิบ ก่อนที่จะนำมาผลิตเป็นน้ำประปา มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ด้าน คือ คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมี ดังนี้

1. ความขุ่น (Turbidity) แสดงถึงปริมาณสารแขวนลอยต่างๆ ที่ปนอยู่ในน้ำ โดยเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ จุลชีพ ฯลฯ มีหน่วยเป็น NTU
2. ความเป็นกรด – ด่าง (pH, พีเอช) แสดงคุณสมบัติ สภาพค่าความเป็นกรดหรือด่างของน้ำ มีขนาดตั้งแต่ 0 ถึง 14 โดยแหล่งน้ำทั่วไปมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6 – 8 ไม่มีหน่วย
3. สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) แสดงถึงสภาพความเป็นด่างของของน้ำ มีหน่วยเป็น mg / l as CaCO_3
4. ปริมาณของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ (Total Suspended Solids, TSS) แสดงถึงปริมาณของแข็งที่ลอยอยู่ในน้ำรวมกับที่ตกตะกอนลงก้นภาชนะ สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า มีหน่วยเป็น mg / l
5. สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นการวัดปริมาณไอออนของน้ำ มีความสัมพันธ์กับการกักกร่อน มีหน่วยเป็น $\mu\text{S} / \text{cm}$.
6. ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen , DO) แสดงถึงความเข้มข้นของค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ
7. การใช้ออกซิเจน (Oxygen Consumed, โอซี) แสดงให้ทราบว่าน้ำมีความสกปรกจากสารอินทรีย์อยู่ในปริมาณมากหรือน้อยโดยวัดจากการใช้ออกซิเจน มีหน่วยเป็น mg / l as O_2

8. แมงกานีส (Mn) พบในแหล่งน้ำทั่วไปในปริมาณที่น้อย ส่วนมากมักพบในน้ำบาดาล ถ้ามีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดคราบดำได้ มีหน่วยเป็น mg / l

9. เหล็ก (Fe) แสดงถึงแหล่งน้ำว่าปริมาณน้ำที่มาจากน้ำใต้ดินมากน้อยเพียงใด โดยวัดเหล็กในรูปของ Ferrous ถ้ามากอาจทำให้มีสีสนิมเหล็กในน้ำประปา มีหน่วยเป็น mg / l

10. ความกระด้าง (Hardness) แสดงถึงค่าความเข้มข้นของเกลือไบคาร์บอเนตที่ทำให้น้ำเกิดความกระด้าง มีหน่วยเป็น mg / l as CaCO_3

11. คลอไรด์ (Chloride) แสดงถึงน้ำว่าไหลผ่านชั้นดินที่เกลือแร่คลอไรด์อยู่และมาจากการมีน้ำทะเลเข้าถึง ทำให้มีรสเค็ม มีหน่วยเป็น mg / l

สารเคมีและกระบวนการที่ทำให้เกิดการตกตะกอน

1. การตกตะกอนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and flocculation)

ความขุ่นในน้ำเกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กในน้ำดิบ ซึ่งเรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด และอนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุไฟฟ้า โดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจำพวก Detergent ส่วนพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ เช่น อนุภาคของดินเหนียว และเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุ ทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกัน เกิดแรงผลักกันระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคเหล่านั้นมีเสถียรภาพสูงตกตะกอนได้ยาก ดังนั้นการทำให้้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นก้อน เพื่อให้ตกตะกอนได้ง่าย จะมีขั้นตอน 2 (มันสัน, 2537) คือ

1.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยเติมสารเคมีให้ตกตะกอน (Coagulant) ให้ผสมกับน้ำดิบอย่างรวดเร็ว เรียกว่า กวนเร็ว จากนั้นกลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) เช่น การเติมสารส้มให้เกิดผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่มีลักษณะเหมือนวุ้นสีขาว เพื่อให้อนุภาคมาเกาะรวมกันเป็นตะกอนใหญ่ เรียกว่า ฟล็อก (Floc.) ได้นั้น ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) มีโอกาส

แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ คือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมาก จึงเกิดโคแอกกูเลชั่นได้ดี ตรงกันข้ามกับน้ำที่มีความขุ่นสูง อาจใช้โคแอกกูแลนต์น้อยกว่า เหตุผล คือ น้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้อยกว่า ดังนั้น แม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม กระบวนการโคแอกกูเลชั่นอาจเกิดขึ้นไม่ได้ดีเท่าที่ควร เป็นสาเหตุให้มีการเติมโคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นสารเป่าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง โอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป่าสัมผัสจากภายนอกมากเท่ากับกรณีแรก

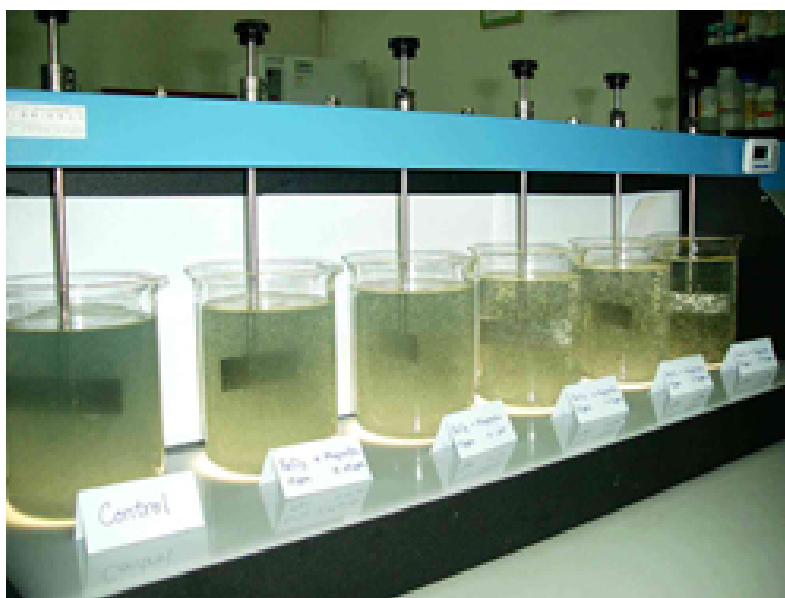
1.2 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่หมดเสถียรภาพแล้ว เคลื่อนที่มาสัมผัส และเกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกคูเลชั่น (Flocculation) โดยอนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น วิธีปฏิบัตินี้เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆ ของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้ วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟล็อกคูเลชั่นเรียกว่า ถังกวนช้า และทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคเกิดขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ ฟล็อกคูเลชั่นด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย โดยอนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูเลชั่นแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าว อาจเกิดฟล็อกคูเลชั่นมาก่อนแล้วครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกคูเลชั่นอีกรอบในขณะที่มีการตกตะกอน

2. กลไกโคแอกกูเลชั่นด้วยสารส้ม

2.1 สารส้ม (Aluminum sulfate) เป็นสารสร้างตะกอนหรือโคแอกกูแลนต์ ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในประเทศไทย เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาที่ไม่แพงมากนัก สารส้ม มีสูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$ ซึ่งเมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะเกิดการแตกตัวให้อิออนบวกและลบ ไปทำปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำดิบ

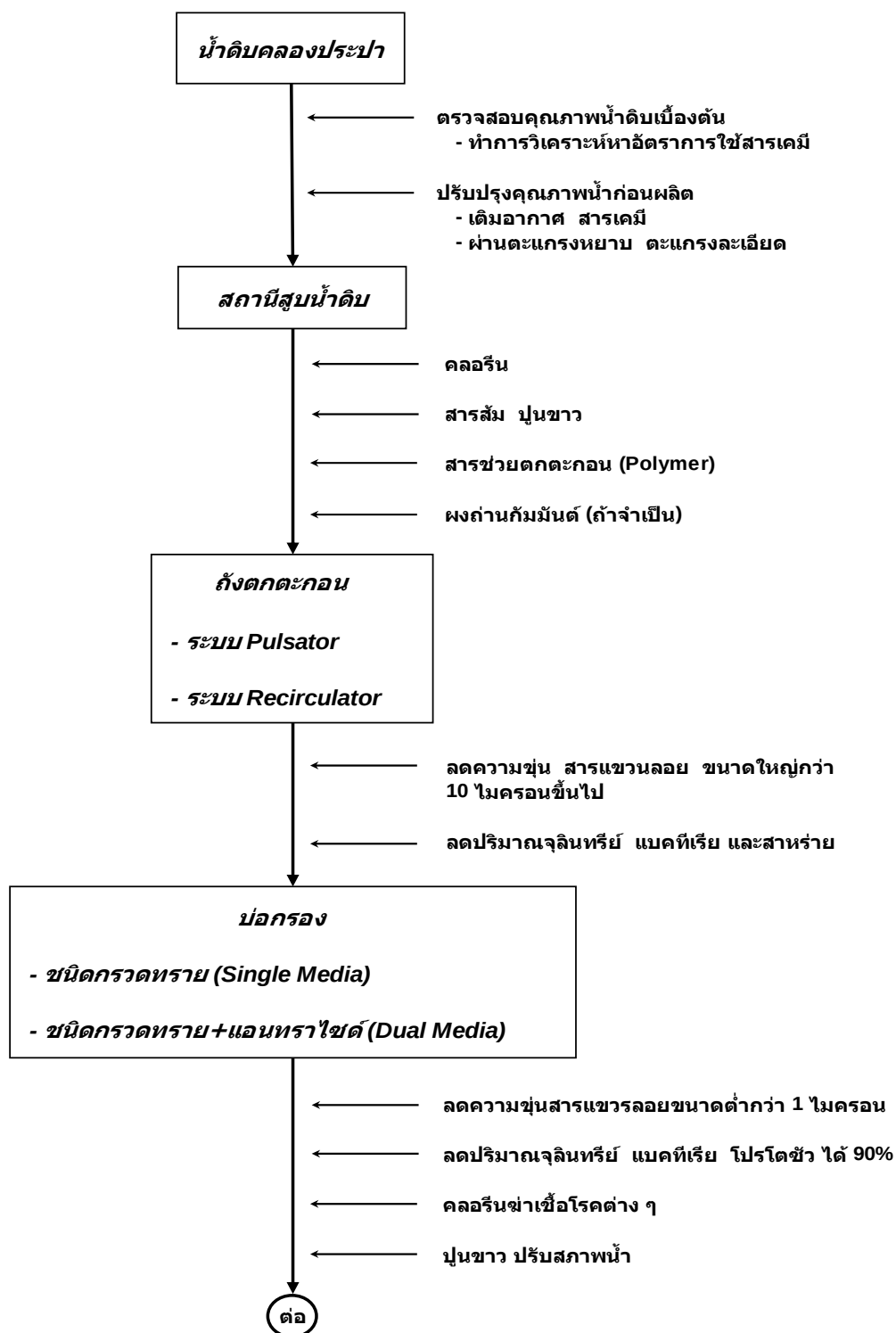
สารเคมีที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ ได้แก่ โพลีอลูมินัมคลอไรด์ (Polyaluminumchloride, PACI), เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride)

2.2 การทดลองจาร์เทสต์ (Jar test) เป็นวิธีที่ใช้มาตั้งแต่ดั้งเดิม และปัจจุบันยังนิยมใช้อยู่อย่างกว้างขวาง จาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบหาปริมาณสารเคมีที่ทำให้เกิดการตกตะกอน สำหรับใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยทำการทดลองในปิกเกอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับความเร็วรอบได้ส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ดังภาพที่ 1 ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และกำหนดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบ ระยะ เวลาการกวนน้ำ และระยะเวลาในการตกตะกอนไว้ค่าหนึ่ง แล้วจึงทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เติม ส่วนระดับค่าพีเอชของน้ำอาจแปรเปลี่ยนหรือคงที่ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การทดลอง จากนั้นก็จะได้ค่าประมาณเป็นชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ และระดับที่ใช้ รวมถึงพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดโคแอกกูเลชัน ในการทดลองควรทำหลายๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

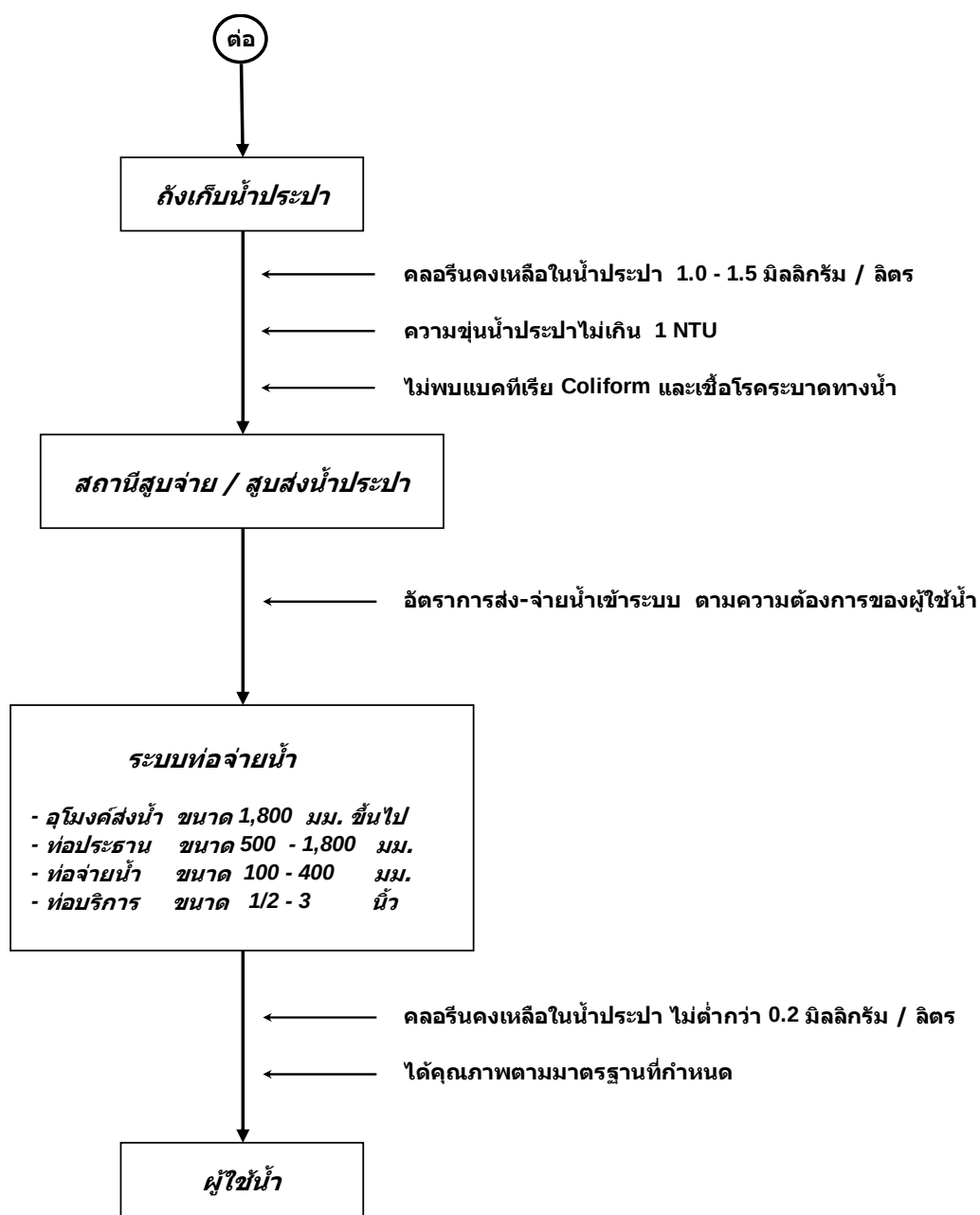


ภาพที่ 1 อุปกรณ์การทดลองจาร์เทสต์ (Jar Test)

กระบวนการผลิตน้ำประปา



ภาพที่ 2 แผนผังกรรมวิธีผลิตน้ำประปา



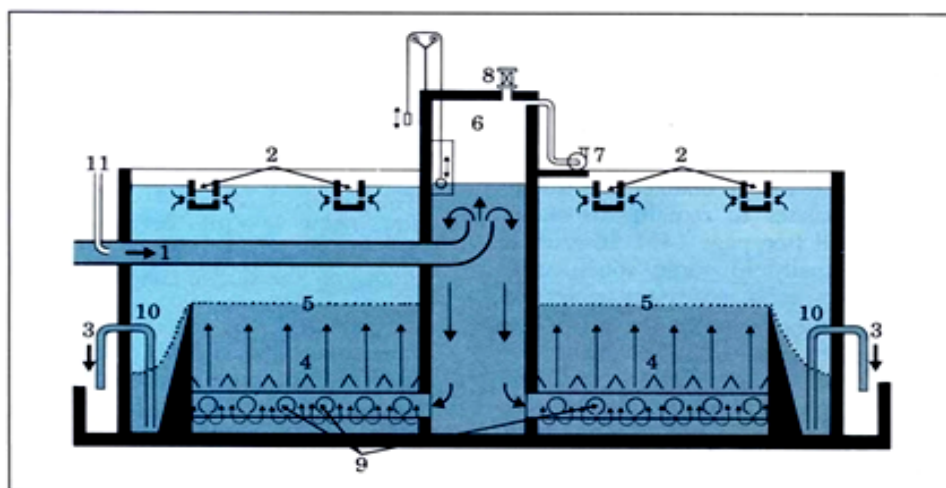
ภาพที่ 2 (ต่อ)

ถังตกตะกอน

ถังตกตะกอนแบบ Vertical Flow Sludge Blanket Clarifier หรือ Pulsator Clarifier (Degremont, 1979) ดังภาพที่ 3 เป็นถังตกตะกอนที่ภายในติดตั้งช่องรับตะกอนส่วนเกิน ท่อกระจายน้ำดิบทางด้านล่าง และท่อรับน้ำใสด้านบน โดยถังตกตะกอนแบบมีชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket) นี้

เป็นแบบที่ไม่ต้องหมุนเวียนตะกอน แต่ต้องรักษาให้มีชั้นตะกอนคงอยู่ตลอดเวลา และต้องเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่แตกกระจาย หรืออัดตัวเกาะกันแน่นบริเวณก้นถัง

เมื่อจ่ายสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์แล้ว น้ำดิบจะไหลเข้าสู่บริเวณห้องสร้างสุญญากาศ (Vacuum Chamber) เพื่อสร้างระดับน้ำ ขึ้น-ลง แล้วไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนทางด้านล่างด้วยแรงดัน จะเกิดกระบวนการกวนเร็ว (Rapid mixing) ขึ้นในบริเวณนี้ และไหลลงด้านล่างถึงผ่านช่องเปิดของท่อกระจายน้ำดิบ เริ่มเกิดกระบวนการกวนช้า (Slow mixing) ขึ้นในบริเวณนี้ จากนั้นน้ำดิบจะไหลผ่านชั้นตะกอนที่มีความหนาแน่นขึ้นไปด้านบน เกิดการจับตัวตกตะกอน โดยส่วนที่เป็นน้ำใสจะไหลขึ้นด้านบนและเข้าสู่รางรับน้ำใส ซึ่งจะจะเป็นรูรับน้ำไว้



- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 - Raw water inlet. | 7 - Vacuum pump. |
| 2 - Clarified water outlet. | 8 - Air release valve. |
| 3 - Sludge removal. | 9 - Raw water distribution system. |
| 4 - Stilling baffles. | 10 - Sludge concentrators. |
| 5 - Upper level of sludge blanket. | 11 - Reagent feed. |
| 6 - Vacuum chamber. | |

ภาพที่ 3 โครงสร้างถังตกตะกอนแบบ Pulsator Clarifier

ที่มา: Degremont water treatment handbook (1979)

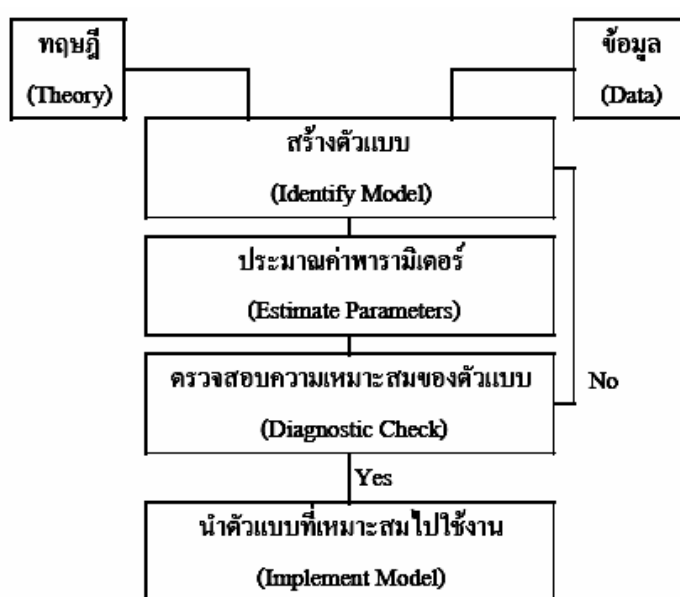
ถังตกตะกอน มีหน้าที่ทำให้อนุภาคสารแขวนลอยในน้ำ ซึ่งได้ทำปฏิกิริยากับสารเคมีแล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกลงสู่ข้างล่างหรือส่วนที่เป็นชั้นตะกอน ทำให้ส่วนที่เป็นน้ำใสแยกออกจากตะกอนแล้วไหลขึ้นไปยังด้านบนของถังสู่รางรับน้ำใส ก่อนไหลเข้าสู่บ่อกรองต่อไป

หลักการทำงาน คือ เมื่อน้ำดิบที่เข้ามาผสมกับสารเคมีด้วยการกวนเร็วจนเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนที่ห้องสุญญากาศแล้วไหลเข้าสู่ด้านล่างถัง จากท่อที่วางตามแนวนพื้นที่เจาะเป็นรูเล็กๆ กระจายน้ำให้ไหลไปทั่วพื้นที่ของถัง น้ำดิบใหม่ที่ไหลเข้ามา ซึ่งมีการจับรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์กับสารเคมีกลายเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตะกอนในบริเวณส่วนล่างถึงกึ่งกลางของถังมีลักษณะเป็นชั้นตะกอนเข้มข้น จะเกิดการชนสัมผัสกันของตะกอนใหม่กับตะกอนเดิม (Solid contact) มีผลทำให้เกิดการเร่งให้มีการรวมตัวกันของตะกอน เพื่อให้ตะกอนตกและมีแรงเกาะกันกลายเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้กระบวนการเกิดน้ำใสสามารถทำได้รวดเร็วขึ้นและทำให้อนุภาคชนสัมผัสกันได้มากขึ้น มีการเกาะรวมตัวกลายเป็นกลุ่มก้อนตะกอนได้มากขึ้น ถึงแม้ว่าในน้ำดิบจะมีอนุภาคในปริมาณน้อย ทำให้ถังตกตะกอนแบบนี้สามารถรับอัตราน้ำไหลสูงกว่าถังตกตะกอนแบบอื่นโดยทั่วไป ถ้าต้องการอัตราการผลิตน้ำให้เพิ่มขึ้น โดยใช้ขนาดถังตกตะกอนเท่าเดิม สามารถใส่ท่อ(tube) หรือแผ่นเอียง(lamellae module) ลงไปในถังพัลเซเตอร์ จึงเรียกชื่อใหม่ว่า Superpulsator ทำให้สามารถเพิ่มค่าอัตรา Surface Overflow ได้เป็น 4 - 8 เมตรต่อชั่วโมง

วัตถุประสงค์ของระบบพัลเซเตอร์(Pulsator) ที่ทำให้เกิดการดึงน้ำขึ้นและปล่อยน้ำลงสลับกันไป เพื่อให้หน้าที่ไหลต่อไปยังด้านล่างของถังตกตะกอนมีแรงที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของชั้นตกตะกอนในถัง ทำให้ตะกอนมีการเคลื่อนและหมุนตัวอยู่ตลอดเวลา เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของตะกอนเก่าที่อาจเกิดการเน่าเสียในชั้นตะกอนขึ้นได้ และทำให้ชั้นตะกอนมีความเข้มข้นใกล้เคียงกันตลอดทั้งชั้น ความเป็นเนื้อเดียวกันของชั้นตะกอน เกิดจากอัตราการยกตะกอน (Pulsation rate) ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อให้ตะกอนเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าอัตราการยกตะกอนช้าเกินไป ชั้นตะกอนก็จะค่อนข้างแน่น และความเข้มข้นของชั้นตะกอนส่วนล่างก็จะสูงกว่าของชั้นตะกอนส่วนบนมาก แต่ถ้าอัตราการยกตะกอนเร็วเกินไป ชั้นตะกอนก็จะแตกตัวทำให้ความเข้มข้นของตะกอนชั้นบนสูงกว่าชั้นล่าง ในขณะเดียวกัน ฟล็อกก็จะหลุดออกไปกับน้ำใสได้ ซึ่งไม่ควรด่วนสรุปผลเร็วเกินไป แต่ควรจะมีการตรวจวัดผลหลายๆ ครั้ง ที่อัตราการไหลคงที่ ถ้าอัตราการไหลลดลงตะกอนก็มักจะอัดตัวกันแน่น ทำให้ผลการวัดความเข้มข้นของตะกอนชั้นล่างสูงขึ้นได้ และอาจจะลอยได้เนื่องจากตะกอนอยู่นานเกินไป ในทางกลับกันถ้าอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ตะกอนก็จะขยายตัวและทำให้ความเข้มข้นของตะกอนชั้นล่างจางลง โดยเหตุผลนี้ จึงควรเชื่อถือผลการทดสอบหลังจากเริ่มเดินระบบไปแล้ว 3 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร หรือการวิเคราะห์ความถดถอย

ทรงศิริ (2548) กล่าวว่า การวิเคราะห์ความถดถอยหรือการสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้น เป็น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม(Dependent Variable, Y)และตัวแปรอิสระ(Independent Variable or Factor, X) ว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในการพยากรณ์ค่าของ ตัวแปรตาม (เมื่อทราบค่าตัวแปรอิสระ) ต่อไป ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย ดังแสดงใน ภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย

1. การวิเคราะห์ความถดถอย

สามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท โดยพิจารณาจากจำนวนตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า ตอบสนองที่ต้องการ ดังนั้น ตัวแบบของความสัมพันธ์ประกอบด้วยรูปแบบหลัก 2 รูปแบบ ดังนี้

1.1 การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression)

$$\hat{y} = f(x) = a + bx \quad (1)$$

สำหรับ ตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว

1.2 การถดถอยเชิงพหุ (Multiple regression)

$$\hat{y} = f(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2)$$

สำหรับ ตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว

2. เกณฑ์การพิจารณาเลือกรูปแบบการถดถอยที่ดีที่สุด

2.1 ใช้ค่าสถิติที่สำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ เรียกวิธีนี้ว่า วิธีพิจารณาทุกรูปแบบ ค่าสถิติที่ใช้มีหลายค่าแต่ที่นำมาใช้กันมาก ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว (R^2_{adj}) ผลรวมกำลังสองเนื่องจากการถดถอย (SSR) ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) ค่า PRESS (prediction sum of squares) และค่า Mallows (C_p)

2.2 ใช้วิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระเข้า และ/หรือ ลดตัวแปรอิสระ ออกจากรูปแบบการถดถอย ซึ่งมีหลายวิธี วิธีที่ใช้กันมาก ได้แก่ วิธีเพิ่มตัวแปรอิสระ (Forward Selection Procedure), วิธีลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination Procedure) และ วิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise Procedure) การเพิ่มหรือการลดตัวแปรอิสระ จะพิจารณาจากค่าสถิติและการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้ในการศึกษาวิจัยเชิงปริมาณทั่วไป

2.2.1 ค่าสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วน ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว และค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดบางส่วน ผลรวมกำลังสองเนื่องจากการถดถอย ผลรวมกำลังสองเนื่องจากการถดถอยบางส่วน ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

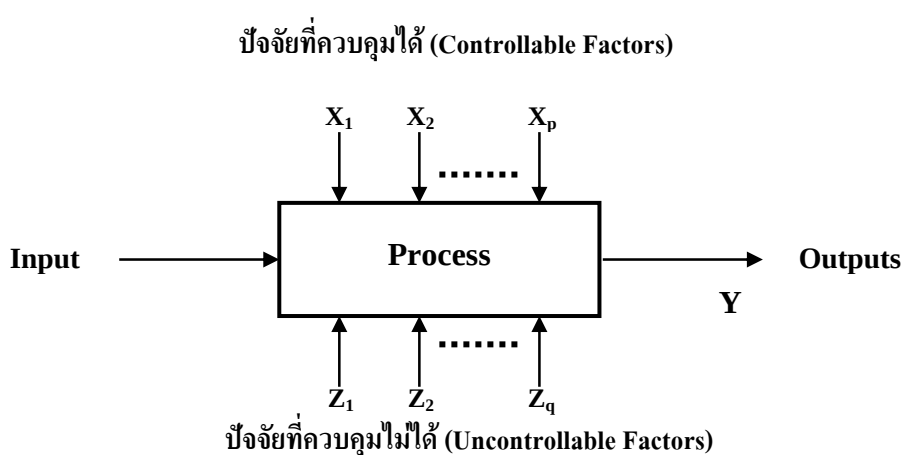
2.2.2 การทดสอบสมมติฐาน ใช้ทั้งการทดสอบแบบ t และแบบ F บางส่วน การทดสอบแบบ F และแบบ t บางส่วน เพื่อทดสอบว่าจะนำตัวแปรอิสระตัวหนึ่งเข้าอยู่ในรูปแบบการถดถอยได้หรือไม่ ทั้งเมื่อไม่มีและมีตัวแปรอิสระอื่นอยู่ในรูปแบบการถดถอยแล้ว และทดสอบว่าจะตัดตัวแปรอิสระตัวหนึ่งที่อยู่ในรูปแบบการถดถอยแล้วออกจากรูปแบบการถดถอย เนื่องจากมีส่วนในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามน้อยมากได้หรือไม่

วิยะดา (2546) กล่าวว่ารูปแบบสมการถดถอยที่ดี ควรเป็นรูปแบบที่มีตัวแปรอิสระอยู่ในรูปแบบน้อยที่สุด แต่มีประสิทธิภาพในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ดี หรืออย่างน้อยใกล้เคียงกับรูปแบบการถดถอยที่มีตัวแปรอิสระมากกว่า และกล่าวถึงเรื่องการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติวิธีหนึ่งที่มีผู้นิยมใช้กันมากในงานหลายสาขา เช่น วิศวกรรมศาสตร์ สังคมศาสตร์ บริหารธุรกิจ เศรษฐศาสตร์ เป็นต้น เพื่อประโยชน์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่และ สัมพันธ์กันในลักษณะใด

การทดลองและการออกแบบการทดลอง

การทดลอง หมายถึง การทดสอบหรือการลอง เพื่อหาผลลัพธ์ที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอน สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ การทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) และ การทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation) ซึ่งจุดประสงค์ที่สำคัญของการทดลองมี 2 ประการ คือ เป็นการยืนยันข้อเท็จจริง เพื่อพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต และเป็นการค้นหาข้อเท็จจริงเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีต่อระบบการผลิต ซึ่งผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บข้อมูล (Montgomery, 2001)

ปารเมศ (2545) กล่าวว่าตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ

กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยน Input ไปสู่ Output ที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งสามารถเห็นได้จากตัวแปรกระบวนการบางชนิด $x_1, x_2, \dots, x_p$ เป็นตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว $z_1, z_2, \dots, z_q$ เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับ

1. หาคำแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบสนอง y
2. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง y เพื่อให้ y อยู่ค่าที่ต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง y เพื่อให้ y มีค่าน้อย
4. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ $z_1, z_2, \dots, z_q$ มีค่าน้อยที่สุด

การทดลองส่วนมากเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัว ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุดจะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์ เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง โดย การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มา ซึ่งข้อมูลที่สมเหตุสมผลวิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น เมื่อต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้ายังเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experiment Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ประกอบด้วยสิ่งสำคัญ 2 ประการ คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งทั้ง 2 สิ่งนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก เพราะว่า วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

Montgomery (2001) กล่าวว่า การออกแบบการทดลอง คือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลอง ที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องการตัดสินใจได้ กล่าวคือ เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือ ตัวแปร (Input Variable) ใด ที่มีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญหรือสิ่งที่สนใจ ในลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response)

ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

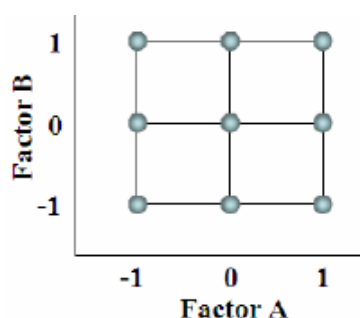
2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

การออกแบบการทดลองเป็นการกำหนดเงื่อนไขที่ทำให้ค่าความแตกต่างของข้อมูลที่แสดงมีสาเหตุจากสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่านั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีสาระสำหรับการตัดสินใจ

1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับ การทดลองที่สนใจปัจจัยตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เนื่องจากการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ขึ้นไปนั้น จะเกิดอิทธิพลจากปัจจัยร่วมต่างๆ ด้วย อธิบายได้ว่าเมื่อปัจจัยหนึ่งๆ เปลี่ยนไปแล้ว ก็ทำให้ผลจากอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปด้วย เกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม หรือ ปฏิสัมพันธ์ (Interaction) การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น เช่น ในกรณีที่มีการทดลอง 2 ปัจจัย โดยที่ ปัจจัย A ประกอบ ด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ จะทำให้มี การทดลองเกิดขึ้น ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล จะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ซึ่งกันและกัน (Crossed)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มี k ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ กำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัย และอันตรกิริยา แทนด้วยอักษรตัวใหญ่และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง หรือเป็นตัวเลข -1, 0, 1 ตัวอย่างโครงสร้างของการออกแบบกรณี 2 ปัจจัย แฟคทอเรียล 3^2 ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างการออกแบบของ 3^2 แฟคทอเรียล

2. การทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design, CCD)

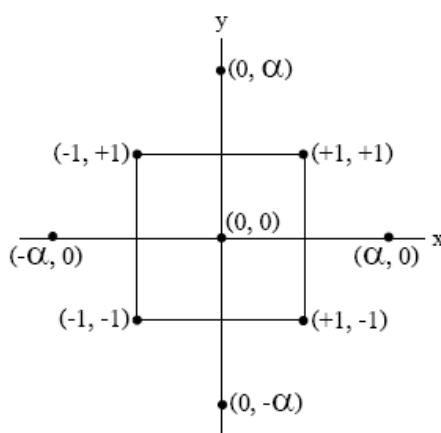
แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต เป็นแผนการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยจำนวน k ปัจจัย ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

2.1 จำนวนจุดของ Factorial Points มีจำนวนเท่ากับ 2^k โดยแต่ละปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัยจะทำการทดลอง 2 ระดับ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ -1 แทนระดับต่ำและ $+1$ แทนระดับสูง ดังนั้นการทดลองสำหรับ Factorial Points สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้คือ $(X_1, X_2, \dots, X_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$

2.2 จำนวนจุดของ Center Points (n_0) จะต้องมีการทำซ้ำ มากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้ทำการคำนวณหา Pure Error ในการวิเคราะห์การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack - of - Fit) การทดลองสำหรับ Center Points เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ คือ $(X_1, X_2, \dots, X_k) = (0, 0, \dots, 0)$

2.3 จำนวนจุดของ Star Points มีจำนวนเท่ากับ $2k$ โดยแต่ละจุดอยู่ห่างจาก Center Points ด้วยระยะที่เท่ากันคือ ระยะ α โดย $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$ จึงเป็นการทดลองที่อยู่ในกลุ่มการทดลองแบบ Rotatable Design การทดลองสำหรับ Star Points เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ คือ $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$

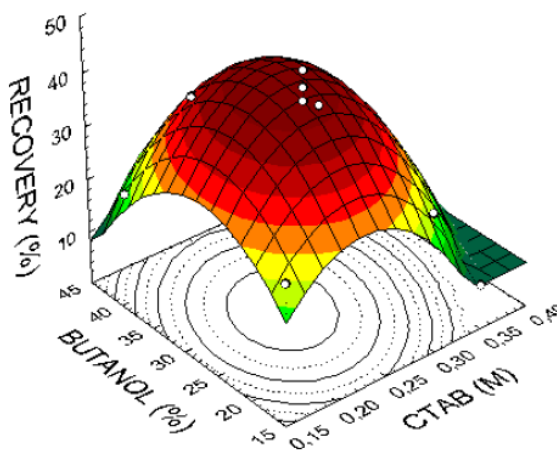
ดังนั้นการทดลองจะมีจำนวนจุดทั้งหมดเท่ากับ ซึ่งการทดลองตามส่วนประกอบดังกล่าวสามารถแสดงตำแหน่งดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงส่วนประกอบของการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต ที่มี 2 ปัจจัย

3. ทฤษฎีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

วิธีการหาค่าพื้นที่ผิวตอบสนองเป็นวิธีการคำนวณภาพแบบหนึ่ง ใช้เทคนิคทางสถิติและคณิตศาสตร์มาใช้ในการปรับปรุงพัฒนา และการหาค่าที่ดีที่สุด สำหรับการนำไปใช้กำหนดเงื่อนไขที่คาดว่าจะเหมาะสมที่สุด วิธีการนี้จะคำนวณหาค่าในพื้นที่ (Region) ที่ดีที่สุดโดยตรง โดยใช้การเลือกจำนวนของการทดลอง แล้วทำการเลือกจุดที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้จากกลุ่มของจุดอื่นที่อยู่รอบๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจุดอื่นที่อยู่รอบๆ จะเป็นลักษณะคล้ายกับตะแกรงของจุดมากมาย ที่อยู่เหนือพื้นที่การออกแบบที่เป็นไปได้ (ปารเมศ, 2545) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปกราฟ 3 มิติและเส้นโครงร่าง
ที่มา: ปาณิกา (2549)

ในการคำนวณโดยวิธี Response Surface จะอยู่ในภาพของฟังก์ชันซึ่งแสดงสมการได้ดังนี้

$$y = f(X_1, X_2) \quad (3)$$

เมื่อ x_1 และ x_2 คือ ตัวแปรที่ต้องการทดสอบ , y คือ จุดใดๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง ดังนั้นวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) จะค้นหาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันระหว่าง y และตัวแปรที่ต้องการทดสอบ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในภาพแบบของ First – order หรือ Main effects คือ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ระดับ (2^k Factorial), การออกแบบเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล 2 ระดับ (2^{k-p} Fractional Factorial) เป็นต้น รูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (4)$$

หรือรูปแบบของ Second – order มีแผนการทดลอง เช่น Central Composite Design (CCD), การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ระดับ (3^k Factorial) เป็นต้น รูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_{11}^2 + \beta_{22} x_{22}^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (5)$$

4. วิธีการทาคุชิ (Taguchi Method)

วิธีการทาคุชิเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เพื่อการปรับปรุงทางด้านคุณภาพ โดยมีแนวทางมาจากการเชื่อว่าคุณภาพที่ดีมาจากการออกแบบที่ดี วิธีนี้จึงให้ความสำคัญไปที่การออกแบบแผนการทดลองและการออกแบบที่ Taguchi ได้เสนอแนะคือ แบบ Robust Design ซึ่งได้ให้นิยามของคำว่า Robust ว่า คือ ลักษณะหรือสภาวะที่ผลิตภัณฑ์หรือการดำเนินงานตามกระบวนการ มีความไวต่อปัจจัยที่เป็นสาเหตุของความผันแปรน้อยที่สุด และทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยต่ำสุด ดังนั้นการออกแบบในลักษณะนี้ จึงเป็นวิธทางวิศวกรรม เพื่อให้ได้สภาวะของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด ภายใต้ความไวที่น้อยที่สุดต่อปัจจัยที่เป็นสาเหตุของความผันแปรต่างๆ และสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงด้วยค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและการผลิตที่ต่ำ

Ross (1988) ได้เสนอแนะว่า ผู้ผลิตควรทำการตรวจสอบและประเมินความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆ ที่ผันแปรไปจากคุณภาพตามเป้าหมาย และหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตเป็นอย่างไร เพื่อความแน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะตรงตามเป้าหมายรวมถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ ที่อยู่นอกการควบคุม และได้แบ่งตัวแปรออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Signal Variable) เป็นตัวแปรที่เกิดภายในกระบวนการผลิตและเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้

2. ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise Variable) เป็นตัวแปรที่โดยทั่วไปเกิดภายนอกกระบวนการและยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต เช่น ความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อมต่างๆ

นอกจากนี้ทากูซียังได้เสนอแนวความคิดที่ว่า การที่ผู้ผลิตจะสามารถก้าวสู่คุณภาพตามอุดมคติได้นั้น ควรทำการตรวจสอบและประเมินความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆว่าแปรผันไปจากคุณภาพตามเป้าหมายเท่าไรและได้แสดงฟังก์ชันความสัมพันธ์ของความสูญเสียในรูปของสมการควอดราติกดังนี้

$$L(Y) = k(Y - \tau)^2 \quad (6)$$

โดยที่ $L(Y)$ คือ ความสูญเสีย

Y คือ ค่าคุณลักษณะเฉพาะตัวที่ได้จากการวัดอย่างต่อเนื่อง

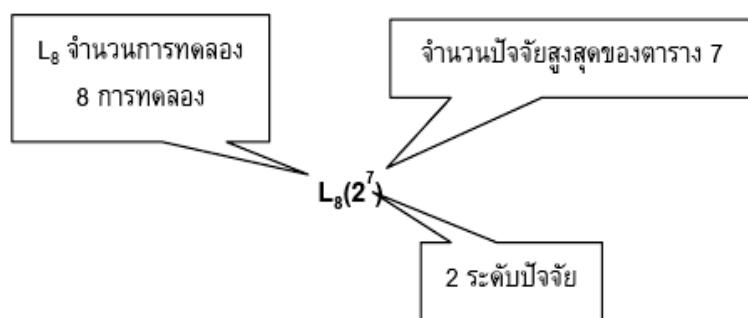
τ คือ ค่าคุณลักษณะตามเป้าหมาย

K คือ ค่าคงที่ที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ของวิธีการทากูชิ คือการทำให้ฟังก์ชันของความสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาฟังก์ชันความสูญเสียที่คาดหมาย พบว่าสามารถแยกผลกระทบออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ผลกระทบที่มีต่อตำแหน่งของกระบวนการ (Location Effect) และผลกระทบที่มีต่อการกระจาย (Dispersion Effect)

การออกแบบการทดลองในอุตสาหกรรมปัจจุบัน จำเป็นต้องใช้การทดลองที่มีจำนวนการทดลองน้อย เพื่อประหยัดต้นทุนและเวลา รวมไปถึงข้อจำกัดอื่นๆ เช่น ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การทดลองแบบต้องทำลายที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีต้นทุนต่อการทดลองสูง ฯลฯ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาต่างๆนี้ วิธีการทากูชิจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ (Orthogonal Array)

ออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ เป็นตารางมาตรฐานที่ใช้ในการลดจำนวนการทดลอง การนำมาใช้งานขึ้นอยู่กับระดับปัจจัย และจำนวนปัจจัยในการทดลอง ซึ่งจำนวนการทดลองเป็นตามตารางมาตรฐานของออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ ตารางจะใช้สัญลักษณ์ แอล(L) และตามด้วยตัวเลขที่บ่งบอกถึงจำนวนการทดลอง จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัย ดังภาพที่ 9 และ ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่าง ตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ $L_8 2^7$ โดยในตารางจะมีการกำหนดระดับปัจจัยไว้ในแต่ละคอลัมน์ หมายเลข 1 ในตารางหมายถึง ระดับปัจจัยที่ 1 และหมายเลข 2 ในตารางหมายถึง ระดับปัจจัยที่ 2

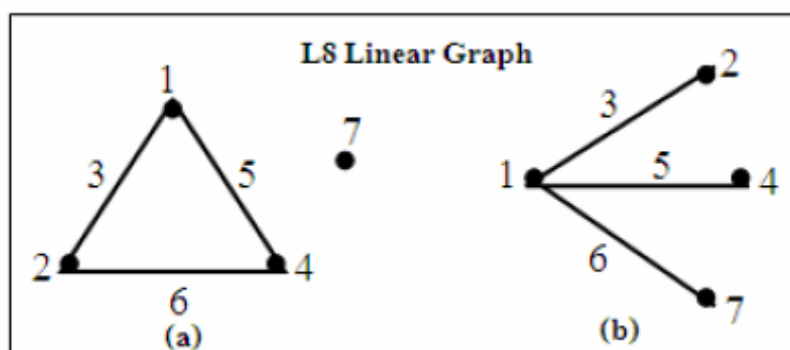


ภาพที่ 9 ความหมายของสัญลักษณ์ตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างตาราง ออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ $L_8 2^7$

Trial no.	Column no.						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

นอกจากนี้ ตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์มาตรฐาน จะมีกราฟเส้นตรง (Linear Graph) โดยเฉพาะของแต่ละตาราง (กราฟเส้นตรง เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดปัจจัยลงในคอลัมน์ของตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์มาตรฐาน) โดยในหนึ่งตาราง จะมีกราฟเส้นตรงมาตรฐานของตารางนั้นได้หลายรูปแบบ เช่น ตารางที่ 1 เป็นตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์มาตรฐาน $L_8 2^7$ จะมีกราฟเส้นตรงมาตรฐานของตารางนี้ 2 แบบด้วยกัน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กราฟเส้นตรงมาตรฐานสำหรับตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ $L_8 2^7$

การใช้ตารางออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ มีข้อดี คือ สามารถลดจำนวนการทดลองให้น้อยลง ซึ่งเป็นผลให้ ลดเวลาและต้นทุนในการทดลองได้อย่างมาก เช่น ศึกษาปัจจัยจำนวน 7 ปัจจัย ที่ 2 ระดับ การทดลองปกติต้องทำการทดลอง 128 ครั้ง ถ้าใช้การทดลองทางสถิติด้วยตาราง L_8 จะเหลือการทดลองเพียง 8 ครั้ง หรือกรณีศึกษาปัจจัยจำนวน 11 ปัจจัย ที่ 2 ระดับ การทดลองปกติต้องทำการทดลองถึง 2048 ครั้ง ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก แต่ถ้าใช้การทดลองทางสถิติด้วยตาราง L_{12} จะเหลือการทดลองที่ต้องทำเพียง 12 ครั้งเท่านั้น

ในการหาผลกระทบของปัจจัย ทำโดยแยกเป็น Inner Array และ Outer Array เพื่อเป็นเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมได้ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ตามลำดับ จากนั้นจะนำเมตริกซ์ทั้งสองมาไขว้กัน (Cross) เพื่อคำนวณหาค่าผลตอบสนอง โดยค่า Performance Statistics ที่เรียกว่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratios, S/N) ซึ่งมีอยู่ 3 ประเภท เนื่องจากว่าลักษณะทางคุณภาพที่สนใจอาจไม่ได้มีเป้าหมายแบบเดียว Taguchi จึงสร้างตัววัดขึ้นมา เพื่อให้สอดคล้องและครอบคลุมเป้าหมายทางคุณภาพทุกชนิดที่เป็นไปได้ แบ่งเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. กรณีน้อยกว่าดีกว่า (Smaller The Better) มีสูตรการคำนวณค่า S/N Ratio คือ

$$S/N_S = -10 \times \log \left[\frac{\sum_{i=1}^r Y_i^2}{r} \right] \quad (7)$$

2. กรณีมากกว่าดีกว่า (Larger The Better) มีสูตรการคำนวณค่า S/N Ratio คือ

$$S / N_L = -10 \times \log \left[\frac{\sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{Y_i} \right)^2}{r} \right] \quad (8)$$

3. กรณีเป้าหมายดีที่สุด (Target The Best) มีสูตรการคำนวณค่า S/N Ratio คือ

$$S / N_T = -10 \times \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (9)$$

โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทางสถิติ เป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ ด้วยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หลายๆ ชุดการทดลอง เพื่อทำการกำหนดค่า (Setting) ระดับของปัจจัยที่ดีที่สุด โดยเลือกกำหนดจากชุดการทดลองที่ให้ค่าของ S/N Ratio สูงที่สุด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในส่วนการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์น้ำหรือสารอื่น โดยใช้วิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์หาสมการการถดถอย ซึ่งผลงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้พื้นฐานวิชาการเดียวกับการวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

วิเชียร (2547) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่บ่งชี้คุณภาพของน้ำในแม่น้ำทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เพื่อหาสมการความสัมพันธ์บ่งชี้คุณภาพน้ำจากพารามิเตอร์ที่วัดค่าได้ง่ายนำไปคาดการณ์พารามิเตอร์ที่สำคัญแต่วัดค่าได้ยาก โดยใช้พารามิเตอร์ค่าบีโอดีเป็นตัวที่ต้องการคาดการณ์ค่า จากข้อมูลการวัดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ 7 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ ความขุ่น ออกซิเจนละลายน้ำ ซีโอดี พีเอช ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าการนำไฟฟ้า จากเก็บรวบรวมผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ผ่านมา มาทำการทดสอบ ผลการวิจัยพบว่ามีเพียงออกซิเจนละลายน้ำและค่าการนำไฟฟ้าเท่านั้นที่มีความสัมพันธ์กับค่าบีโอดี โดยใช้รูปแบบสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นตรง

Odigure *et al.* (2005) ศึกษาหาสมการคณิตศาสตร์ทำนายพารามิเตอร์ความขุ่นของน้ำ ในโรงงานผลิตน้ำประปา จากการวิเคราะห์น้ำทางเคมีซึ่งมีต้นทุนสูง จึงต้องทำการค้นหาทางเลือกอื่นๆในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ สำหรับงานวิจัยนี้พยายามสร้างสมการค่าความขุ่นเป็นตัวแปรคุณภาพน้ำ ซึ่งได้สมการคณิตศาสตร์สำหรับการกำจัดความขุ่นได้ถูกพัฒนา โดยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำและเกณฑ์คุณภาพน้ำอื่นๆ ผลที่ได้แสดงว่าความขุ่นได้รับผลสะสมจากตัวแปรแต่ละชนิดและปัจจัยที่กระทบต่อระบบ สมการสำหรับการประเมินและทำนายความสามารถของถังตกตะกอน(Clarifier) ได้ถูกพัฒนา ดังนี้

$$T = T_0 \left(-1.36729 + 0.03710 \cdot 10^{\lambda \cdot pH} + 0.048928 \cdot t + 0.00741387 \text{ alk} \right) \quad (10)$$

โดยมีความสัมพันธ์กับตัวแปร อุณหภูมิ ความขุ่นน้ำเริ่มต้น พีเอช และค่าความเป็นด่าง ดังนั้นสมการนี้จะช่วยในการประเมินความสามารถของถังตกตะกอนได้ ซึ่งข้อจำกัดของสมการเป็นผลจากตัวแปรที่กำหนด

Uyak *et al.*(2007) ทำการศึกษาหาสมการถดถอยเพื่อการคาดคะเนปริมาณสารที่เป็น by-products จากการใช้สารเคมีในการฆ่าเชื้อโรค จากแหล่งน้ำดื่มใน Istanbul ซึ่งการออกซิเดชันของน้ำดิบด้วยคลอรีนทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน(THM) และกรดฮาโลอะซีติก(HAA) ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิด ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของอินทรีย์วัตถุ ความเป็นกรด-ด่าง(pH) อุณหภูมิ ปริมาณคลอรีน เวลาสัมผัส และความเข้มข้นของโบรไมด์ ส่วนกลไกในการเกิดสารทั้งสองชนิดยังคงทำการศึกษากันอยู่ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ทำการทดลองการเติมคลอรีน กับตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำTerkos ทะเลสาบ Buyukcekmece และ Omerli ใน Istanbul ซึ่งมีความขุ่นในส่วนความเข้มข้นของโบรไมด์และปริมาณอินทรีย์วัตถุแตกต่างกัน ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ pH เวลาสัมผัส ปริมาณคลอรีนและค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตจำเพาะ(SUVA) ส่วนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ by – product จากการฆ่าเชื้อโรค(DBP) ใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ใช้การพัฒนาสมการการถดถอย เพื่อทำนายความเข้มข้นของ THM ทั้งหมดและ HAA ทั้งหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า pH เวลาสัมผัส ปริมาณคลอรีนและSUVA ซึ่งสมการให้ผลการประมาณค่าความเข้มข้นของ DBP ได้เป็นที่น่าพอใจ สัมประสิทธิ์การถดถอยของ THM และ HAA เท่ากับ 0.88 และ 0.61 ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่า Durbin-Watson ยังแสดงความน่าเชื่อถือได้ของทั้งสองสมการ ภายใต้สภาวะการทดลองนี้ การเกิด THM และ HAA ในน้ำสามารถอธิบายได้โดยเทคนิคสมการถดถอยเชิงเส้น

การวิจัยในส่วนการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ซึ่งผลงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้พื้นฐานวิชาการเกี่ยวกับการวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

โสภณ (2545) การศึกษาเกณฑ์การควบคุมและประสิทธิภาพของถังกำจัดความขุ่นแบบใช้ชั้นตะกอนในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ โรงงานผลิตน้ำประปาแพงพวย จังหวัดราชบุรี ที่มีกำลังการผลิต 24,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ หาปริมาณสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม โพลีเมอร์ชนิดประจุลบ และปูนขาว มาทดลองหาค่าที่เหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดความขุ่นมากที่สุด จากนั้นนำค่าที่เหมาะสมที่ได้ไปทดลองใช้ในระบบผลิต เพื่อดูผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า เมื่อใช้สารโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นโดยสารอื่นคงที่ ทำให้การกำจัดความขุ่นมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

Intro (2005) ทำการศึกษาผลของ อัตราพัลเซชัน อัตราน้ำล้นผิว และระยะยกของน้ำในห้องสุญญากาศ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดความขุ่นของถังตกตะกอนแบบพัลเซชันแคลรีฟายเออร์ โดยจำลองถังตกตะกอนขึ้นมาสำหรับใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยปรับอัตราการพัลเซชัน 3 ระดับ (6 , 10 , 14 เมตรต่อชั่วโมง) ปรับอัตราน้ำล้นผิว 3 ระดับ (2.90 , 3.22 , 3.54 เมตรต่อชั่วโมง) และปรับความสูงในการยกระยะน้ำในห้องสุญญากาศ 3 ระดับ (0.40 , 0.60 , 0.80 เมตร) ผลการทดลองพบว่า อัตราการพัลเซชันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น แต่อัตราน้ำล้นผิว กับความสูงระยะยกน้ำในห้องสุญญากาศมีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพ โดยถ้าค่าทั้งสองเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลงและค่าที่เหมาะสมที่สุดมีประสิทธิภาพ 95.47% คือ ที่ค่าพัลเซชัน 14 เมตรต่อชั่วโมง อัตราน้ำล้นผิว 3.22 เมตรต่อชั่วโมง ความสูงระยะยกของน้ำในห้องสุญญากาศ 0.6 เมตร

การวิจัยทางด้านการปรับปรุงคุณภาพการผลิตของกระบวนการ โดยใช้วิชาการที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิต เทคนิคทางด้านสถิติ หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน และการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองตามหลักการทาคุชิ (Taguchi's Design and Analysis of Experiment) ซึ่งผลงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้พื้นฐานวิชาการเกี่ยวกับการวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

นวรรตน์ (2548) ทำการศึกษารูปแบบการทดลอง เพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเหวี่ยงลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจรของโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์ เพื่อต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้และปรับปรุงค่า C_{pk} ให้เพิ่มขึ้นรวมถึงลดความผันแปรของกระบวนการ โดยประยุกต์ใช้หลักการทางสถิติต่างๆ มาใช้ เช่น การออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์การถดถอย การควบคุมกระบวนการทางสถิติ มาใช้ร่วมกัน และยังนำผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ 2 วิธี คือแผนการทดลองเชลล์ทรีลคอมโพสิตกับวิธีการทางสถิติ มาเปรียบเทียบกันโดยทั้งสองแผนให้ผลของปัจจัยหลักเหมือนกัน แต่มีอยู่หนึ่งเครื่องจักรที่ให้ผลของอิทธิพลร่วมต่างกัน และเมื่อผลที่ได้จากการทดลองไปใช้จริง พบว่าสามารถเพิ่มค่าเฉลี่ยแรงเนียนลูกบอลลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพิ่มค่า C_{pk} ได้ทั้ง 2 แบบ แต่ค่าตามแผนการทดลอง CCD ให้ผลที่ดีกว่าแผนทางสถิติ

ปาณิกา (2549) ทำการพัฒนาประสิทธิภาพงานหล่อเครื่องประดับ ด้วยการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยทำการทดลองในโรงงานเครื่องประดับ ที่พบว่ามิของเสียเป็นจำนวนมาก เมื่อพิจารณาของเสียที่เกิดขึ้นพบว่า เป็นของเสียที่เกิดจากการ เกิดผิบบนผิวชิ้นงานเป็นจำนวนมากถึง 54.18% การเกิดผิบบนผิวชิ้นงานเครื่องประดับ มาจากกระบวนการหล่อ โดยปัจจัยต่างๆ 5 ปัจจัยที่อาจส่งผล คือ อุณหภูมิการหล่อ เวลาอบเบ้า อุณหภูมิน้ำโลหะ มุมเอียงชิ้นงาน และขนาดทางเดินน้ำโลหะ จึงทำการทดลองเพื่อ Screen Factor ด้วยวิธีทางสถิติ 2 ระดับ จากนั้นพบว่า อุณหภูมิการหล่อ และอุณหภูมิน้ำโลหะ มีผลต่อการเกิดผิบบนผิวชิ้นงานหล่อเครื่องประดับเงินอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^2 เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง แล้วนำปัจจัยที่เหมาะสมไปหล่อชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 200 ชิ้น ซึ่งเป็นชิ้นงานที่เคยเกิดผิบบนผิวสูงถึง 78.21% พบว่า สามารถลดจำนวนชิ้นงานการเกิดผิบบนผิวลงเหลือ 24.50% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อได้ถึง 53.71 %

Doolana *et al.* (2001) ทำการศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองที่แตกต่างกัน 2 วิธี เพื่อศึกษากระบวนการตีแผ่นโลหะ คือ มีการทำการทดลองซ้ำที่ระดับทรีทเมนต์ต่างๆ กัน (Replicated DOE Method) และไม่มีทำการทดลองซ้ำที่ระดับทรีทเมนต์ต่างๆ กัน (Nonreplicated DOE Method) ซึ่งทั้ง 2 วิธีสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ โดยมองจากความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้ และจากตัวชี้ความผันแปรในกระบวนการ จากการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีนี้ให้ผลเหมือนกันมาก แต่อย่างไรก็ตาม วิธีที่มีการทำซ้ำถึงจะมีความแม่นยำแต่การทำซ้ำเป็นจำนวนมากๆ จะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ส่วนวิธีการที่ไม่มีการทำซ้ำนั้นจะประหยัดค่าใช้จ่ายและสามารถให้ผลลัพธ์ที่เพียงพอในระยะเวลาช่วงสั้นๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องสูบน้ำดิบแบบปรับอัตราการสูบน้ำได้
2. อุปกรณ์จ่ายสารส้มพร้อมอุปกรณ์วัดอัตราการไหล
3. อุปกรณ์จ่ายคลอรีนพร้อมอุปกรณ์วัดอัตราการจ่าย
4. ถังตกตะกอนแบบมีชั้นสัจฉั
5. กระบอกตวงสำหรับเก็บน้ำตัวอย่าง
6. เครื่องวัดความขุ่นน้ำ
7. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
8. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ
9. อุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ในการทำวิจัย
10. เครื่องพิมพ์

วิธีการ

1. ศึกษากระบวนการผลิตและวิเคราะห์ปัญหาในโรงงานผลิตน้ำประปา

ทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำประปา สำนวสสภาพการทำงานของโรงงาน เก็บรวบรวมข้อมูล ข้อบกพร่องต่างๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อเลือกปัญหาที่จะนำมาปรับปรุงแก้ไข

2. กำหนดหัวข้อปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมาย

เมื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและการดำเนินการแก้ไข โดยทำการสำวสสภาพปัญหา เพื่อทำความเข้าใจกับสถานการณ์ของปัญหา ซึ่งในการวิจัยนี้คือ ปัญหาในส่วนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในขั้นตอนการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ หลังจากนั้นจึงกำหนดเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่ต้องการแก้ไขปัญหา

3. วางแผนแก้ไขปัญหาดตามวัตถุประสงค์

ทำการวางแผน กำหนดกิจกรรมที่ต้องทำ คือ

3.1 การหาวิธีช่วยคาดการณ์ ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ ในการตกตะกอน อย่างเหมาะสม เพื่อเป็นระบบสนับสนุนการดำเนินงาน โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพน้ำดิบกับปริมาณการใช้สารส้ม

3.2 การหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพ ของการกำจัดความขุ่นในขั้นตอนการตกตะกอน โดยลดการใช้สารเคมี และควบคุมความขุ่นของน้ำหลังผ่านการตกตะกอนให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ โดยการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น

4. หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพน้ำดิบกับปริมาณการใช้สารส้ม

โดยวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพน้ำดิบกับปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) จากข้อมูลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบและการทดสอบจาร์เทสต์หาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมรายวัน ที่หน่วยควบคุมคุณภาพน้ำของโรงงาน เก็บรวบรวมไว้ย้อนหลัง มาทำการศึกษาเป็นข้อมูลเบื้องต้นจากการวิเคราะห์และเก็บรวบรวมข้อมูลไว้ ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2549 – 2551

4.1 ค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบ ที่เกิดจากการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างชุดเดียวกัน นำมาพิจารณา เพื่อคัดเลือกจากทั้งหมด 11 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความขุ่น พีเอช สภาพความเป็นด่าง ปริมาณของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ สภาพน้ำไฟฟ้า ออกซิเจนละลายน้ำ โอซี แมงกานีส เหล็ก ความกระด้าง คลอไรด์ และกำหนดให้ปริมาณสารส้มที่ใช้จนเกิดการตกตะกอนที่เหมาะสม คงเหลือความขุ่นน้ำ 5 NTU เป็นตัวแปรตามหรือผลตอบสนอง

4.2 คัดเลือกค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบบางประการ เฉพาะที่ส่งผลต่อการตกตะกอนทางทฤษฎี กำหนดเป็นตัวแปรอิสระ มาสร้างสมการความสัมพันธ์ กับตัวแปรตาม จากข้อมูลปี พ.ศ. 2549 และ 2550

4.3 สร้างโมเดลแบบที่ 1 โดยนำข้อมูลพารามิเตอร์ของตัวแปรที่คัดเลือกมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ รูปแบบสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ ด้วยวิธี Stepwise

4.4 สร้างโมเดลแบบที่ 2 โดยนำข้อมูลพารามิเตอร์ของตัวแปรที่คัดเลือกมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ รูปแบบสมการถดถอยพหุคูณโพลิโนเมียลอันดับสอง โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ ด้วยวิธี Stepwise

4.5 สร้างโมเดลแบบที่ 3 เป็นรูปแบบสมการยกกำลัง โดยสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระทีละตัว ในรูปตัวแปรอิสระยกกำลังใดๆ เพื่อหาตัวเลขยกกำลังที่เหมาะสม โดยพิจารณาเลือกจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่มากที่สุด เพื่อสร้างข้อมูลพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแปรอิสระขึ้นมาใหม่ และนำมาพิจารณาหาสมการความสัมพันธ์พหุคูณเชิงเส้น โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ ด้วยวิธี Stepwise

4.6 ทำการทดสอบสมการโมเดลที่ได้ โดยนำข้อมูลพารามิเตอร์ที่เก็บรวบรวมไว้ของปี พ.ศ. 2551 มาแทนค่าตัวแปรในโมเดลทั้งสาม เพื่อหาค่าปริมาณสารส้มจากการคำนวณ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าการใช้สารส้มที่เหมาะสมที่ทราบค่า คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการ

$$\% \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{(\text{สารส้มคำนวณ} - \text{สารส้มที่เหมาะสม})}{\text{สารส้มที่เหมาะสม}} \right| \times 100 \quad (11)$$

4.7 พิจารณาเลือกสมการที่เหมาะสมของแต่ละโมเดล จากจำนวนตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ค่า R^2_{adj} และค่าความคลาดเคลื่อน กำหนดเป็นสมการโมเดลสำหรับนำไปใช้คาดการณ์ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

5. วางแผนออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลอง

ทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการกำจัดความขุ่น ในขั้นตอนการตกตะกอนด้วยสารเคมีของถังตกตะกอนแบบมีชั้นสลัดจ์ ที่มีปัญหาต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการควบคุมการกำจัดความขุ่น ตามขั้นตอน ดังนี้

5.1 เลือกผลตอบสนองสำหรับใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัย โดยเลือกค่าความขุ่นของน้ำภายหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนจากถังตกตะกอน เป็นผลตอบสนอง

5.2 คัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการตกตะกอน ด้วยแผนผังเหตุและผล จากนั้นเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลมาทำการทดลองในเบื้องต้นด้วยวิธีการทาгуชิ เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอนออกไป โดยพิจารณากรณี S/N Ratio น้อยกว่าดีกว่า

5.3 ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์ข้อมูล จากการทดลองเบื้องต้น ทำให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่น มาทำการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต(CCD) เพื่อหาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อค่าความขุ่นของน้ำหลังผ่านการตกตะกอน

5.4 นำผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ และหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

6. วิเคราะห์ และประเมินผล

นำผลจากการวิเคราะห์หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง นำมากำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการกำจัดความขุ่นในถังตกตะกอน มาทำการทดลองยืนยันผลในระบบการผลิตจริง และทำการเก็บข้อมูลแล้ววิเคราะห์ เพื่อประเมินผล

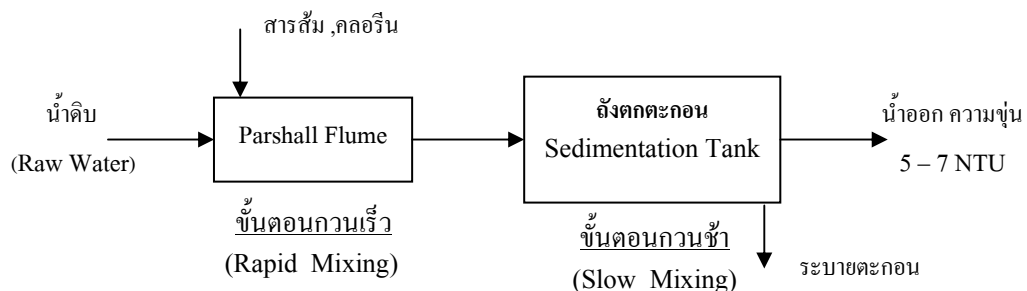
7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัย การยืนยันผล และคำนวณค่าสถิติต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิต ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

ผลและวิจารณ์

1. การกำหนดหัวข้อปัญหา

จากการเข้าไปศึกษากระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานตัวอย่าง พบว่า เกิดปัญหาที่ขั้นตอนการตกตะกอน เพื่อกำจัดความขุ่นของน้ำดิบในระบบของถังตกตะกอนแบบใช้ชั้นสไลด์ที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงพิจารณากระบวนการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดนี้ ซึ่งมีขั้นตอนการกำจัดความขุ่นน้ำดิบ ดังแสดงในภาพที่ 11 และจากปัญหาดังกล่าว ทำให้เกิดผลกระทบกับการดำเนินงานของโรงงาน ดังนี้คือ



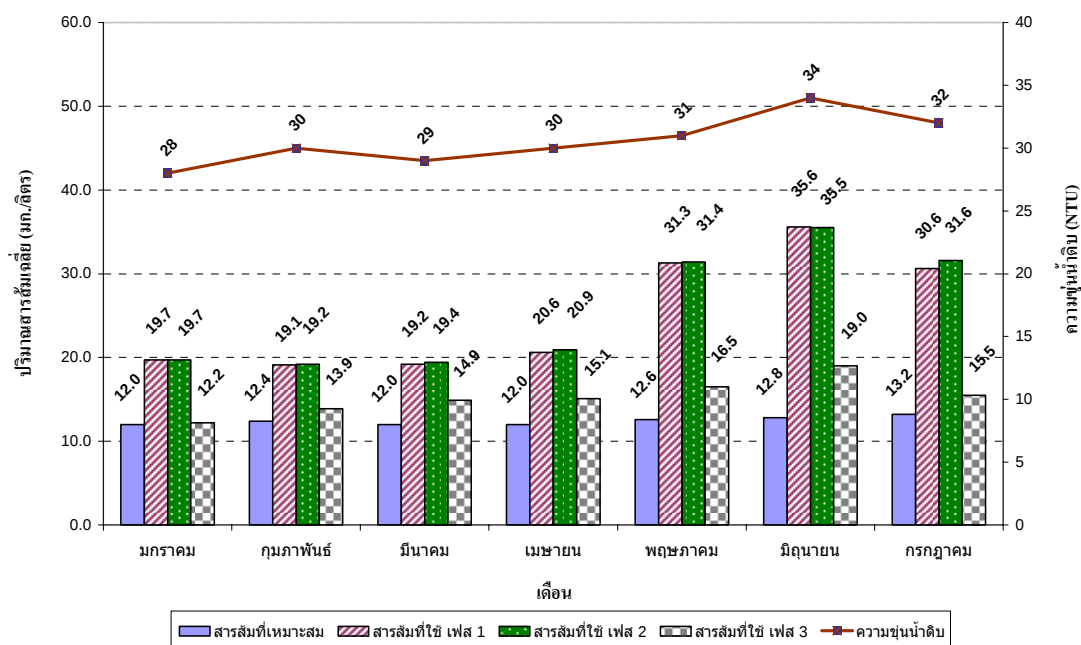
ภาพที่ 11 ขั้นตอนการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน

- 1.1 ต้องใช้สารเคมีในการปรับสภาพน้ำในปริมาณที่สูง เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต
- 1.2 เกิดน้ำสูญเสียปริมาณมากขึ้นจากการระบายตะกอนทิ้งของถังตกตะกอน เพื่อต้องการลดความขุ่นให้ได้ตามเกณฑ์
- 1.3 ความขุ่นของน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนมีค่าความขุ่นสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ทำให้เกิดการเพิ่มภาระให้กับบ่อกรองที่อยู่ในขั้นตอนกระบวนการผลิตถัดไป
- 1.4 ไม่สามารถทำการผลิตที่อัตราการผลิตสูงได้ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้เป็นไปตามมาตรฐานได้
- 1.5 ต้องใช้ระยะเวลานาน และการคาดเดาจากประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้สามารถควบคุมความขุ่นน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนได้

ดังนั้นจึงเลือกหัวข้อปัญหา การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ของถังตกตะกอนแบบมีชั้นสไลด์ มาพิจารณาแก้ไขและปรับปรุง

2. สํารวจสภาพปัจจุบันและตั้งเป้าหมาย

จากการสำรวจข้อมูลของปริมาณการใช้สารส้ม (Alum Dosage) เพื่อให้เกิดการตกตะกอน ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึงเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2551 พบว่า ต้องใช้ปริมาณสารส้มในการผลิตจริงสูงกว่าค่าปริมาณความต้องการสารส้มทางทฤษฎีจากการวิเคราะห์จาร์เรสต์มาก โดยเฉพาะในช่วงเดือน พฤษภาคม ถึง เดือน กรกฎาคม เนื่องจากการที่ต้องปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตน้ำที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาบ่อยครั้งขึ้น ตามนโยบายการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้น้ำ โดยจำเป็นต้องรักษาระดับน้ำประปาในถังกักเก็บให้อยู่ในระดับสูงตลอดเวลา ประกอบกับการที่สภาพคุณสมบัติของน้ำดิบเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าปริมาณสารส้มที่ใช้ในระบบผลิตและสารส้มที่เหมาะสมกับค่าความขุ่นน้ำดิบ

จากภาพที่ 12 พบว่า ระบบการผลิต เฟส 1, 2 มีการใช้ปริมาณสารส้มที่สูงกว่าใน เฟส 3 ค่อนข้างมาก มีสาเหตุมาจากชนิดของถังตกตะกอนที่แตกต่างกัน คือ เฟสที่ 1 และ 2 เป็นถังตกตะกอนแบบมีชั้นสัจฉ์ ส่วน เฟสที่ 3 เป็นถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนตะกอน ประกอบกับการปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตน้ำมักจะทำให้ เฟส 1, 2 มากกว่า เฟส 3 ทำให้ปริมาณตะกอนที่มีอยู่เดิมในถังหนาแน่นอยู่ตลอดเวลา จึงจับตัวกับตะกอนความขุ่นน้ำใหม่ที่เข้าสู่ถังได้ดีกว่า และหลักการ

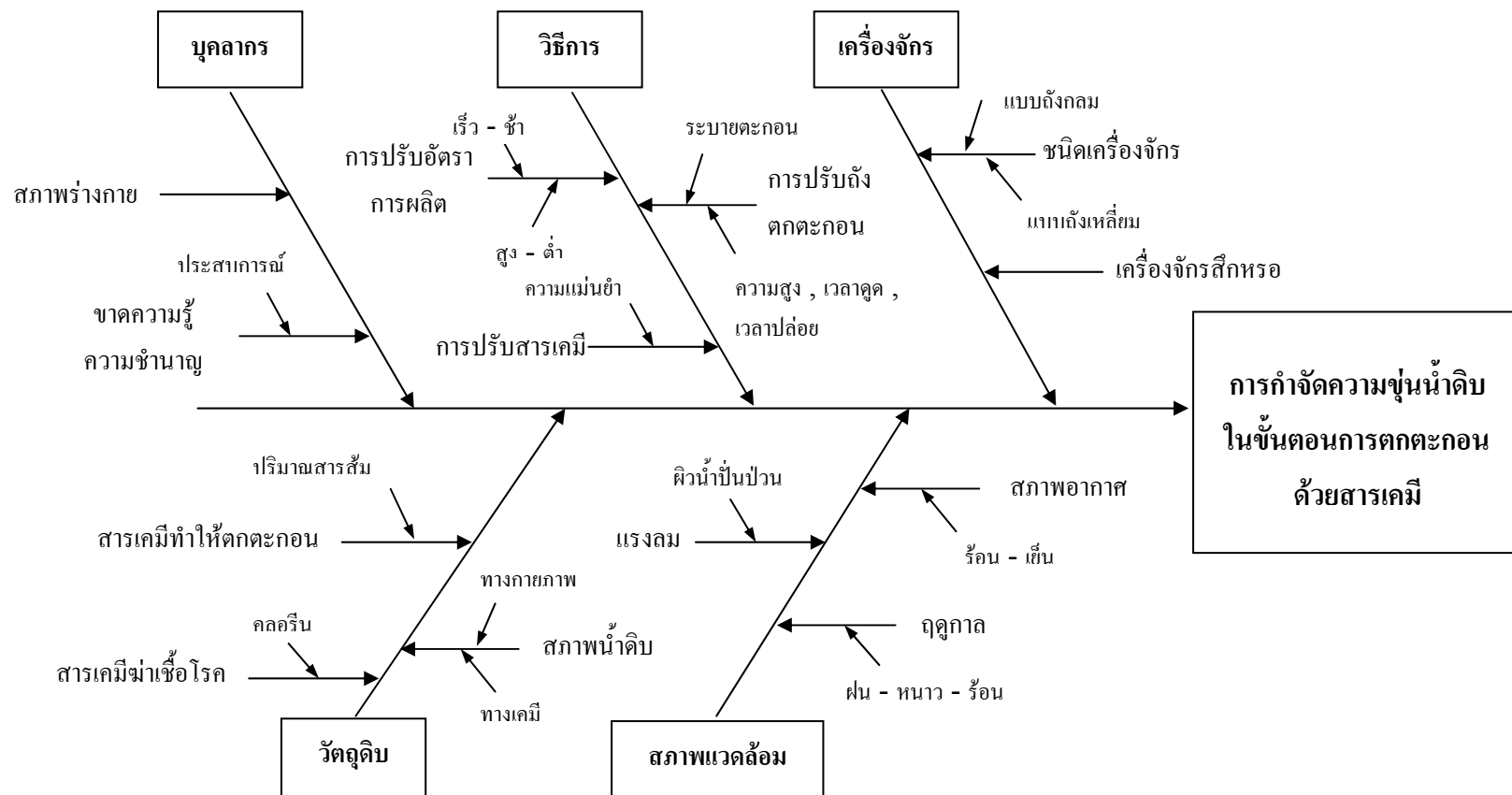
ทำงานการปรับตั้งความเร็วใบพัดกวนตะกอน เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันของอนุภาคตะกอนก็ทำได้ง่าย ดังนั้น เฟส 3 จึงใช้ปริมาณสารส้มที่น้อยกว่าในการควบคุมให้ค่าความขุ่นน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ช่วง 5 – 7 NTU เพราะฉะนั้นเป้าหมาย คือ ต้องการลดปริมาณการใช้สารเคมี ในการกำจัดความขุ่น ของถังตกตะกอนแบบมีชั้นสลัดจ์ อย่างมีประสิทธิภาพ และหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการตกตะกอน โดยปัจจัยเหล่านั้น จะต้องสอดคล้องกับขีดจำกัดที่มีอยู่ทั้งภายในและภายนอกกระบวนการ ให้ได้ผลลัพธ์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

3. วิเคราะห์สาเหตุ

ในขั้นตอนนี้จะทำการค้นหาสาเหตุของปัญหาการใช้สารเคมีที่มากเกินไปจนเกินความจำเป็น และการสูญเสียทรัพยากรอื่นๆของการกำจัดความขุ่นในขั้นตอนการตกตะกอน โดยวิธีการระดมสมองของทีมงาน ซึ่งประกอบด้วยผู้ทำวิจัย วิศวกรผู้มีความรู้ในกระบวนการผลิต นักวิทยาศาสตร์ผู้มีความรู้กระบวนการทางเคมีและพนักงานประจำสถานีควบคุมถังตกตะกอน ซึ่งเป็นผู้มีความชำนาญ โดยในการเสนอความคิดเห็นจะเปิดรับทั้งหมด ไม่จำกัด เพื่อป้องกันการตกหล่นของสาเหตุที่มีผลต่อปัญหา แล้วจะนำความคิดเห็นที่ได้มาทำการจัดกลุ่มตามที่มาเป็นหมวดหมู่ด้วยแผนภูมิสาเหตุ และผล ดังภาพที่ 13 แสดงรายละเอียดสาเหตุที่มีผลกระทบต่อการกำจัดความขุ่นน้ำดิบของถังตกตะกอนในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาการขาดประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ด้วยแผนภูมิเหตุและผล พบว่ามีปัจจัยหลักด้านต่างๆ ประกอบด้วยสาเหตุจาก คน วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร วิธีการ และสภาพแวดล้อม ซึ่งสามารถพิจารณาตีความได้ ดังนี้

3.1 สาเหตุจากคน เนื่องจากพนักงานขาดความชำนาญ ยังไม่มีประสบการณ์ในการทำงาน การปรับเครื่องจักร อุปกรณ์มีความยุ่งยาก ขาดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงต้องเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ หลักการของกระบวนการผลิต และการใช้งานเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ ให้เหมาะสม โดยการฝึกอบรม ถ่ายทอดความรู้ให้แก่พนักงาน สภาพร่างกายของพนักงานในแต่ละที่ปฏิบัติงานแตกต่างกันจากอายุที่มาก ความสามารถในการมอง ความเหนื่อยล้าจากการที่ต้องทำงานในช่วงเวลากลางคืน ความเอาใจใส่ดูแลงาน ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนในการวัดค่าและปรับตั้งค่า จากอุปกรณ์ต่างๆได้



ภาพที่ 13 แผนภูมิเหตุและผลวิเคราะห์หาสาเหตุที่ส่งผลต่อการจัดการความชุ่มของถังตกตะกอน

3.2 สาเหตุจากวัตถุดิบ สภาพน้ำดิบมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทั้งทางด้านกายภาพ และทางเคมี มีการเติมคลอรีนซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค กำจัดสิ่งมีชีวิตเล็กๆในน้ำเป็นบางครั้ง ทำให้คุณสมบัติน้ำในถังตกตะกอนเปลี่ยนไป มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณและความเข้มข้นการเติมสารส้มเพื่อให้ น้ำดิบเกิดการตกตะกอน การเติมสารเคมีโพลิเมอร์ช่วยในการทำให้ตกตะกอนดีขึ้น ซึ่งการเลือกชนิดและปริมาณสารเคมีในการทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี จนเกิดการตกตะกอนที่เหมาะสม ต้องอาศัยวิธีการทดลองวิเคราะห์ด้วยจาร์เทสต์ ที่มีความยุ่งยาก สิ้นเปลืองและใช้เวลานาน

3.3 สาเหตุจากเครื่องจักร จากถังตกตะกอนและอุปกรณ์เกี่ยวเนื่องที่แตกต่างกันในแต่ละแบบของถังลักษณะกลมกับลักษณะสี่เหลี่ยม ทำให้เกิดการกววนเร็ว การกววนช้า มีพื้นที่น้ำล้นผิวและทิศทางการไหลของน้ำ แตกต่างกัน ซึ่งอาจเหมาะสมกับสภาพน้ำดิบที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยในน้ำต่างกันได้อีกทั้งเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีอายุการใช้งานมาเป็นเวลานาน ขาดการบำรุงรักษาเท่าที่ควร มีการสึกหรอของอุปกรณ์ ทำให้ความถูกต้องแม่นยำลดน้อยลง

3.4 สาเหตุจากวิธีการ การปรับอัตราการผลิตหรือปริมาณการสูบน้ำดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตไปยังถังตกตะกอน มีการปรับเพิ่ม – ลด อย่างรวดเร็วและรุนแรง หรือปรับที่อัตราการผลิตขนาด สูง – ต่ำแตกต่างกันมาก ทำให้ความหนาแน่นของตะกอนที่มีอยู่เดิมในถังถูกทำลายจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วน้ำอย่างรวดเร็ว การปรับตั้งค่าการทำงานของถังตกตะกอนไม่เหมาะสม ได้แก่ ความสูง เวลาดูดอากาศ เวลาปล่อยอากาศในการฟลเชชั่น ความเร็วรอบใบกววนตะกอน ปริมาณการระบายตะกอนส่วนเกินทิ้ง วิธีการปรับตั้งให้ได้ค่าถูกต้องตามที่ต้องการ จากการเลือกโหมดการทำงาน เช่น ควบคุมด้วยเวลา หรือ ควบคุมด้วยระดับความสูง

3.5 สาเหตุจากสภาพแวดล้อม จากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา ความแตกต่างกันของอุณหภูมิในเวลากลางวันกับเวลากลางคืน ความแตกต่างกันของสภาพฤดูกาล มีฝนตก อากาศหนาวเย็น แสงแดดที่ร้อนมากส่งกระทบกับตัวถังตกตะกอนและผิวน้ำ ความแรงของลมที่พัดผ่านผิวน้ำของน้ำจนกระทบกับการไหลลื่นของน้ำอาจทำให้น้ำไหลไม่สม่ำเสมอ ปริมาณสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำแต่ละช่วงฤดูกาล เช่น สาหร่าย

จากสาเหตุของปัญหาที่กล่าวมาแล้วนั้น พบว่าสาเหตุที่มีความสำคัญและคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อกรำจัดความขุ่นด้วยการตกตะกอนอย่างมากนั้น คือ คุณสมบัติความขุ่นของน้ำดิบ อัตราการผลิต ปริมาณการเติมสารส้ม จุดในการจ่ายสารส้ม การเติมหรือไม่เติมคลอรีนขึ้นต้น

การทำให้เกิดฟัลเซชันโดยการปรับตั้งค่า ระยะความสูงในการยกน้ำ เวลาในการปล่อยอากาศ เวลาในการดูดอากาศ ของห้องสูญญากาศ ความถี่ในการระบายตะกอนส่วนเกิน ซึ่งทั้งหมดกำหนดเป็นปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยต่อไป ซึ่งได้แก่ การวางแผนแก้ไขปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนโดย

ก. การหาวิธีช่วยคาดการณ์ปริมาณการใช้สารเคมีในการตกตะกอนอย่างเหมาะสม เพื่อเป็นระบบสนับสนุนการดำเนินงาน ด้วยการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบกับปริมาณสารส้มที่ใช้ในการทำให้อนุภาคแขวนลอยในน้ำดิบตกตะกอน เนื่องจากวิธีการเดิม ได้แก่ การทดลองวิเคราะห์จาร์เทสต์ มีความยุ่งยาก ใช้เวลานาน และสิ้นเปลืองสารเคมีทดสอบ ทำให้ไม่สามารถประเมินการใช้สารเคมีที่เหมาะสมได้บ่อยครั้งนัก

ข. การหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ของขั้นตอนการตกตะกอน โดยลดการใช้สารเคมี และควบคุมความขุ่นของน้ำหลังผ่านการตกตะกอนให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งต้องหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม

4. ผลการศึกษาหาปริมาณสารส้มในขั้นตอนตกตะกอน

จากค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบที่พิจารณา ทั้งหมด 11 พารามิเตอร์ พบว่า ตัวแปรที่มีคุณสมบัติส่งผลต่อการใช้สารเคมี คือ สารส้ม เพื่อให้เกิดกระบวนการตกตะกอนของน้ำดิบ ได้แก่ ความขุ่น(Tur) พีเอช(pH) สภาพความเป็นด่าง(Alk) ความกระด้าง(Har) (มันลิน, 2537) โดยพิจารณาดังนี้

4.1 พิจารณาเลือกพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบบางประการกำหนดเป็นตัวแปรอิสระ

4.1.1 ความขุ่น กำหนดชื่อตัวแปรเป็น Tur มีคุณสมบัติส่งผลต่อการใช้สารส้ม คือ ความขุ่นน้ำดิบเป็นคุณสมบัติแรกที่ต้องการลดค่าลง โดยการกำจัดสารที่แขวนลอยในน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดความขุ่น ได้แก่ ดินโคลน สารอินทรีย์ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กและอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็ก ซึ่งอนุภาคความขุ่นมีประจุไฟฟ้าเหมือนกัน จึงมีการผลักกันตลอดเวลา ทำให้ฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำ การทำลายประจุของความขุ่นนี้เพื่อให้เกิดการจับตัวกันได้ของอนุภาคความขุ่น จนมีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถตกตะกอนกำจัดออกจากน้ำได้นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมสารส้ม

4.1.2 พีเอช กำหนดชื่อตัวแปรเป็น pH มีคุณสมบัติส่งผลต่อการใช้สารส้ม คือ ค่าความเป็นกรด – ด่างมากหรือน้อย มีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมี โดยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเมื่อเติมสารส้ม ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดลงไปให้น้ำดิบเพื่อทำปฏิกิริยาการตกตะกอนทางเคมี ต้องควบคุมค่าพีเอชของน้ำให้คงที่หรืออยู่ในช่วงที่จำกัดและเหมาะสมในการเกิดการรวมตะกอนดีที่สุด คือช่วง 6.5 – 8.5 และปลอดภัยสำหรับการใช้บริโภค ดังนั้นการเติมสารส้มลงไปปริมาณมาก จะทำให้ค่าพีเอชของน้ำดิบลดลงได้

4.1.3 สภาพความเป็นด่าง กำหนดชื่อตัวแปรเป็น Alk มีคุณสมบัติส่งผลต่อการใช้สารส้ม คือ ความสามารถที่บ่งบอกถึงสภาพน้ำว่าจะรับโปรตรอน(H^+) โดยสามารถทำให้น้ำมีสภาพความเป็นกลางได้โดยเติมกรด ซึ่งจากสารส้มที่ใช้ในการตกตะกอนของน้ำดิบ จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและจะปล่อยโปรตรอนออกสู่น้ำ ไปทำปฏิกิริยาต่อเนื่องจากความเป็นด่างในน้ำ ดังนั้น ความเป็นด่างของน้ำ จึงเป็นการรักษาระดับพีเอชของน้ำให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการตกตะกอน (มีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ในการคงระดับค่าพีเอชไว้) โดยค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำ ควรมีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไปที่จะถูกทำลายโดยความเป็นกรดที่ปล่อยออกมาจากสารส้ม เพื่อให้เกิดการตกตะกอนอย่างได้ผลสมบูรณ์

4.1.4 ความกระด้าง กำหนดชื่อตัวแปรเป็น Har มีคุณสมบัติส่งผลต่อการใช้สารส้ม คือ ความกระด้าง แสดงถึงปริมาณเกลือแคลเซียม (Ca) หรือแมกนีเซียม (Mg) ที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยสารประกอบในรูปของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) จะสัมพันธ์กับสภาพความเป็นด่าง ดังนั้น ความกระด้างจึงสามารถช่วยในการควบคุมรักษาระดับการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้เช่นเดียวกันกับสภาพความเป็นด่าง

4.2 สํารวจข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย

จากข้อมูลในอดีตที่ได้เก็บรวบรวม โดยหน่วยวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ช่วงปี พ.ศ. 2549 – 2550 จำนวน 730 ตัวอย่าง ด้วยข้อมูลตารางผนวกที่ ก1 นำมาวิเคราะห์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนี้

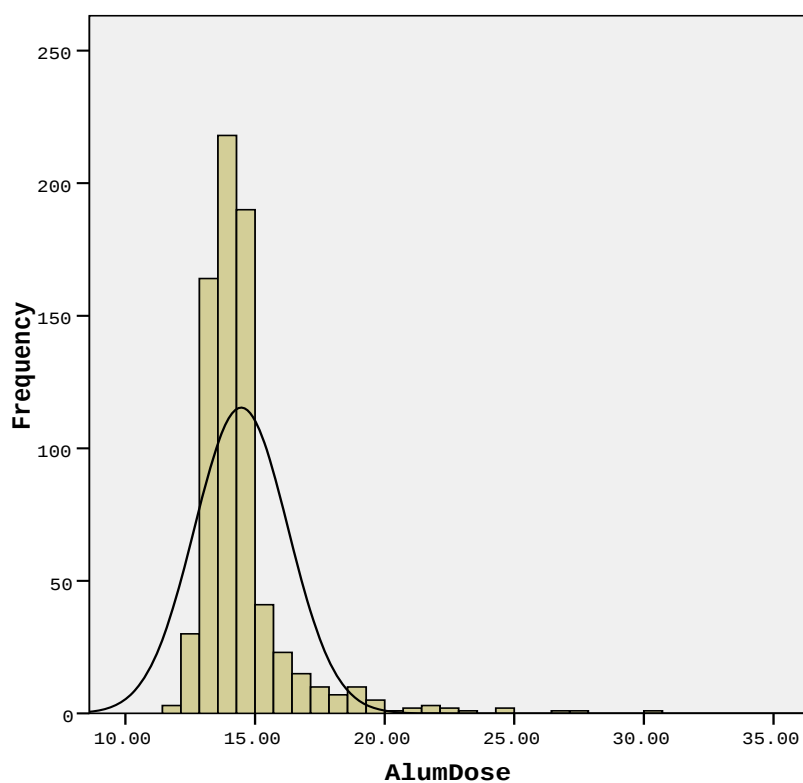
ตารางที่ 2 แสดงค่าข้อมูลเบื้องต้นของตัวแปรที่ทำการศึกษา

N = 730	Tur	pH	Alk	Har	Alum Dose
Mean	31.59	8.1579	101.69	103.78	14.47
Max	99	8.49	138	142	30.14
Min	17	7.44	76	80	11.94
Std.Dev	10.787	0.15961	11.291	11.272	1.803

พิจารณาลักษณะการแจกแจงของข้อมูลตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ค่าปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสม (AlumDose) ในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ ว่ามีรูปแบบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ลักษณะสมมาตรหรือไม่ โดยการวัดค่ากลาง ค่าการกระจาย ค่าแสดงการแจกแจง ดังแสดงในตารางที่ 3 และพล็อตกราฟฮิสโตแกรม ดังภาพที่ 14 พบว่า ค่าเฉลี่ย (Mean) สูงกว่าค่ามัธยฐาน (Median) ค่าความเบ้ (Skewness) เป็นบวกและมีค่าสูง แสดงว่ากราฟมีลักษณะไม่สมมาตรเบ้ขวา ค่าความโด่ง (Kurtosis) มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากราฟมีความโด่งมาก การกระจายตัวน้อย และจากทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ด้วยค่าสถิติทดสอบ Kolmogorov - Smirnov ได้ผลดังแสดงในตารางภาพผนวกที่ ข1 พบว่าค่า Sig. = 0.00 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) แสดงว่า ค่าAlumDoseไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ จึงต้องทำการเปลี่ยนรูปแบบข้อมูล (Transformation) ของตัวแปร AlumDose ให้การแจกแจงของข้อมูลเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น โดยการแก้ไขปัญหการแจกแจงที่มีลักษณะเบ้ขวา สามารถใช้รูปแบบ $\log_{10}$ ทำให้มีรูปแบบข้อมูลปกติขึ้น (อัญริยา, 2547) ซึ่งตัวแปรตอบสนองจะมีค่าเท่ากับ $\log_{10}(\text{AlumDose})$ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยต่อไป และจากการตรวจสอบเบื้องต้นว่าตัวแปรแต่ละตัวมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรตอบสนองที่ทำการเปลี่ยนรูปแบบแล้วหรือไม่ ด้วยการทำ Scatterplot ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข1 พบว่า ตัวแปรความขุ่น มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนเป็น $\log_{10}(\text{AlumDose})$ อย่างมาก ส่วนตัวแปรอื่นๆ ไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจน

ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบลักษณะของข้อมูล AlumDose

ผลลัพธ์ลักษณะของข้อมูล		
N	Valid	730
Mean		14.4699
Median		14.1150
Std. Deviation		1.80326
Skewness		3.578
Std. Error of Skewness		0.090
Kurtosis		19.140
Std. Error of Kurtosis		0.181
Percentiles	25	13.5000
	75	14.7025



ภาพที่ 14 กราฟฮิสโตแกรมแสดงค่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

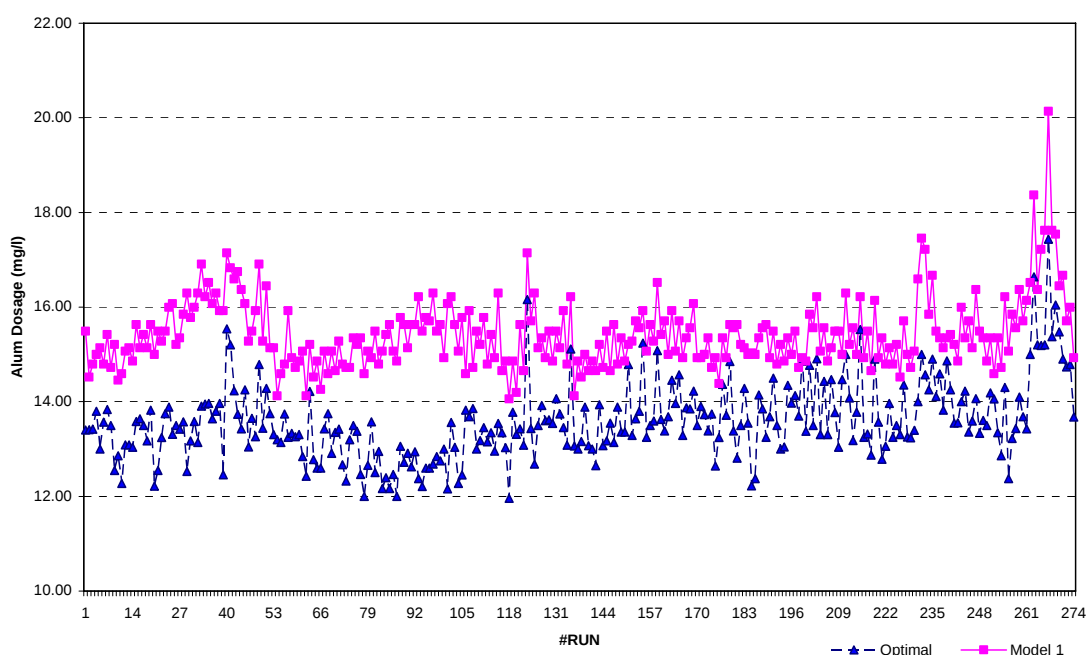
4.3 วิเคราะห์การถดถอยแบบพหุที่มีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร ด้วยโมเดลที่กำหนด

4.3.1 โมเดลที่ 1 สมการพหุคูณเชิงเส้น จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข2 คงเหลือตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ 2 ตัวแปร ได้แก่ ค่าความขุ่น (Tur) กับสภาพความเป็นด่าง (Alk) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าแล้ว $R^2_{adj} = 0.719$ และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Log}_{10}(\text{AlumDose}) = 0.958 + 0.004 \text{ Tur} + 0.001 \text{ Alk} \quad (12)$$

(1) การตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล ด้วยวิธีวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน เริ่มจากการตรวจสอบการแจกแจงของความคลาดเคลื่อน โดยการพล็อตกราฟฮิสโตแกรมของค่า Standardized Residuals และพล็อตกราฟของ Normal probability plot (NP) จากภาพผนวกที่ ข2 พบว่า กราฟฮิสโตแกรมมีรูปร่างการแจกแจงปกติ และกราฟ NP มีลักษณะกระจายเรียงเป็นเส้นตรง แสดงว่า การแจกแจงของความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0 สำหรับการตรวจสอบความเป็นอิสระกันของความคลาดเคลื่อน ใช้วิธีการทดสอบค่าสถิติ Durbin-Watson พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.197 ซึ่งน้อยกว่า 1.5 แสดงว่า ความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวมีความสัมพันธ์กันเล็กน้อยในเชิงบวก ส่วนการตรวจสอบเกี่ยวกับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน โดยใช้วิธีการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนายของตัวแปรตาม ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข2 พบว่า การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน อยู่รอบค่า 0 แต่เมื่อค่าทำนายของตัวแปรตามสูงขึ้น ปรากฏว่าการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนมีรูปแบบไปในทิศทางบวกเล็กน้อย แสดงว่า ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนไม่คงที่

(2) ทดสอบสมการความสัมพันธ์รูปแบบโมเดลที่ 1 ระหว่างปริมาณสารสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าความขุ่น สภาพความเป็นด่าง โดยนำข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำและปริมาณสารสัมพันธ์ที่เหมาะสมรายวัน จำนวน 274 ตัวอย่าง ทดสอบนำค่าพารามิเตอร์แทนค่าตัวแปรในสมการ หาปริมาณสารสัมพันธ์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณสารสัมพันธ์ที่เหมาะสมทางทฤษฎีจากการทดลองจาร์เทสต์ ด้วยข้อมูลตารางผนวกที่ ก2 พบว่า จากข้อมูลที่มีการแปลงค่าสารสัมพันธ์กลับมาเป็นปกติแล้ว มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ 13.91 % พิจารณาเปรียบเทียบปริมาณสารสัมพันธ์ที่ทำนายจากโมเดล 1 กับสารสัมพันธ์ที่เหมาะสม ได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 1

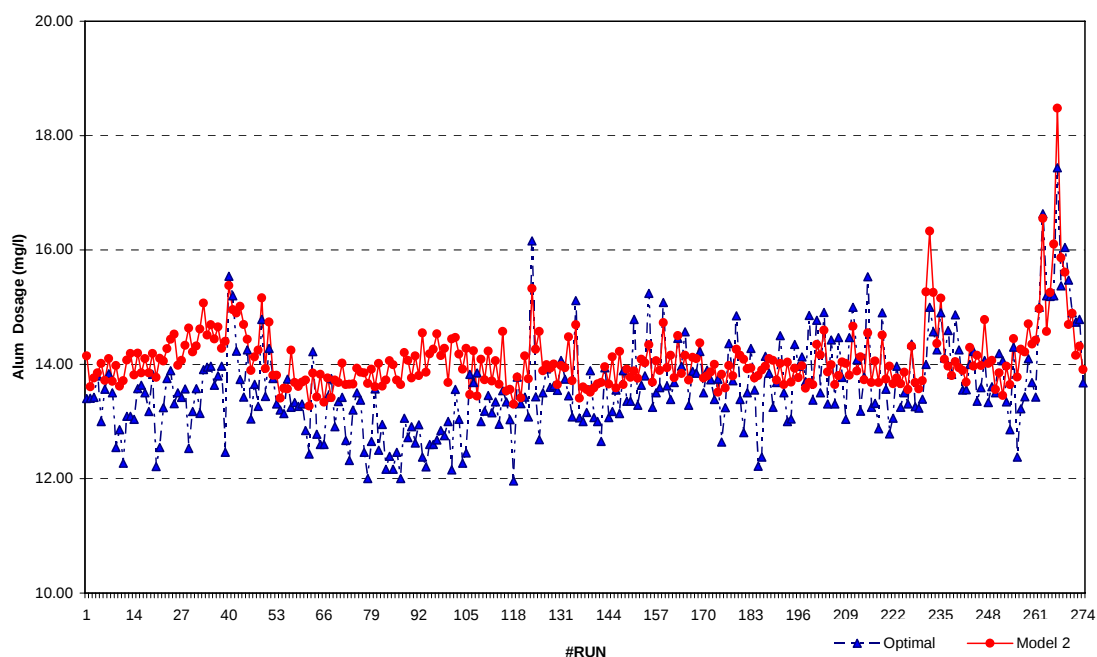
4.3.2 โมเดลที่ 2 สมการพหุนามอันดับสอง จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข3 หาสมการความสัมพันธ์ด้วยวิธี Stepwise พบว่า คงเหลือตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ 3 ตัวแปร ประกอบด้วยพจน์ต่างๆ ได้แก่ สภาพความเป็นด่าง (Alk) ความกระด้าง (Har) พจน์กำลังสองของค่าความขุ่น (Tur^2) พจน์กำลังสองของสภาพความเป็นด่าง (Alk^2) และพจน์ร่วมของสภาพความเป็นด่างกับความกระด้าง ($Alk \times Har$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าแล้ว $R^2_{adj} = 0.795$ และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10}(\text{Alum Dose}) = & 1.372 + 4.21E-05 \text{ Tur}^2 - 3.4E-05 \text{ Alk} \times \text{Har} - 0.010 \text{ Alk} + \\ & 6.70E-05 \text{ Alk}^2 + 0.004 \text{ Har} \end{aligned} \quad (13)$$

(1) การตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล ด้วยวิธีวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน เริ่มจากการตรวจสอบการแจกแจงของความคลาดเคลื่อน โดยการพล็อตกราฟฮิสโตแกรมของค่า Standardized Residuals และพล็อตกราฟของ Normal probability plot จากภาพผนวกที่ ข3 พบว่า กราฟฮิสโตแกรมมีรูปร่างการแจกแจงเป็นปกติ และ กราฟ NP มีลักษณะกระจายเรียงเป็นเส้นตรง แสดงว่า การแจกแจงของความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0 สำหรับการตรวจสอบความเป็นอิสระกันของความคลาดเคลื่อน ใช้วิธีการทดสอบ ค่าสถิติ

Durbin-Watson พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.555 ซึ่งมากกว่า 1.5 แสดงว่า ความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวมีความเป็นอิสระต่อกัน ส่วนการตรวจสอบเกี่ยวกับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน โดยใช้วิธีการพล็อตกราฟ ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนายของตัวแปรตาม ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข3 พบว่า การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน อยู่รอบค่า 0 แสดงว่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่

(2) ทดสอบสมการความสัมพันธ์ รูปแบบโมเดลที่ 2 ระหว่างปริมาณสารส้มกับค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าความขุ่น สภาพความเป็นด่าง และความกระด้าง โดยนำข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำและปริมาณสารส้มที่เหมาะสมรายวัน จำนวน 274 ตัวอย่าง ทดสอบนำค่าพารามิเตอร์แทนค่าตัวแปรในสมการ หาปริมาณสารส้มที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสมทางทฤษฎีจากการทดลองจาร์เจสต์ ด้วยข้อมูลตารางผนวกที่ ก2 พบว่า จากข้อมูลที่มีการแปลงค่าสารส้มกลับมาเป็นค่าปกติแล้ว มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.98% พิจารณาเปรียบเทียบปริมาณสารส้มที่ทำนายจากโมเดล 2 กับสารส้มที่เหมาะสม ได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 2

4.3.3 โมเดลที่ 3 สมการพหุคูณเชิงเส้นปรับปรุงตัวแปรยกกำลัง จากการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารส้ม และค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำแต่ละตัว เพื่อหาค่าการยกกำลังของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างสมการ โดยพิจารณาจากค่า R^2 พบว่า

ก. ความสัมพันธ์ของ ปริมาณสารส้ม กับ ค่าความขุ่นน้ำดิบ พิจารณาสมการเส้นตรง $\text{Log}_{10}(\text{Alum Dose}) = a (\text{Tur})^n + c$ และความสัมพันธ์ ระหว่างค่าตัวแปรตาม กับตัวแปรอิสระค่าความขุ่นยกกำลัง n โดยค่าที่ทำให้ค่า R^2 สูงที่สุด คือ $n = 2.13$ และมีค่า $R^2 = 0.74062$

ข. ความสัมพันธ์ของ ปริมาณสารส้ม กับ ค่าพีเอช พิจารณาสมการเส้นตรง $\text{Log}_{10}(\text{Alum Dose}) = a (\text{pH})^n + c$ และความสัมพันธ์ ระหว่างค่าตัวแปรตาม กับตัวแปรอิสระค่าพีเอชยกกำลัง n โดยค่า n ที่ทำให้ค่า R^2 สูงที่สุด คือ $n = 2.06$ และมีค่า $R^2 = 0.10342$

ค. ความสัมพันธ์ของ ปริมาณสารส้ม กับ สภาพความเป็นด่าง พิจารณาสมการเส้นตรง $\text{Log}_{10}(\text{Alum Dose}) = a (\text{Alk})^n + c$ และความสัมพันธ์ ระหว่างค่าตัวแปรตาม กับตัวแปรอิสระค่าพีเอชยกกำลัง n โดยค่าที่ทำให้ค่า R^2 สูงที่สุด คือ $n = 9.87$ และมีค่า $R^2 = 0.01020$

ง. ความสัมพันธ์ของ ปริมาณสารส้ม กับ ความกระด้าง พิจารณาสมการเส้นตรง $\text{Log}_{10}(\text{Alum Dose}) = a (\text{Har})^n + c$ และความสัมพันธ์ ระหว่างค่าตัวแปรตาม กับตัวแปรอิสระค่าความกระด้างยกกำลัง n โดยค่าที่ทำให้ค่า R^2 สูงที่สุด คือ $n = 5.37$ และมีค่า $R^2 = 0.01687$

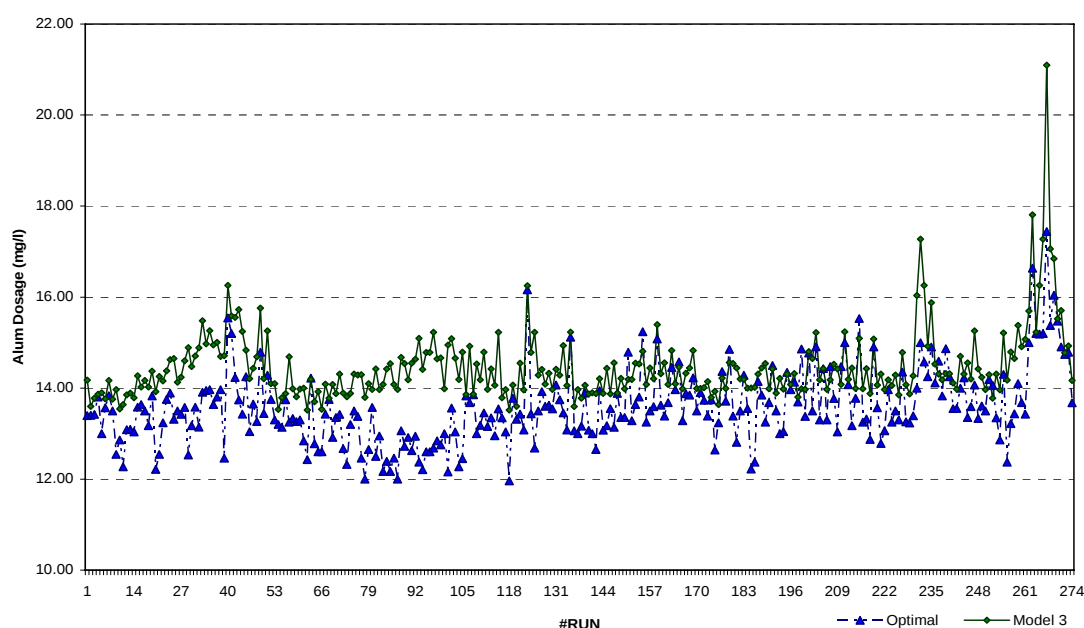
นำข้อมูลในแต่ละพารามิเตอร์ที่ยกกำลังด้วยตัวเลขข้างต้น ที่ได้ปรับปรุงแล้วไปวิเคราะห์ จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS คงเหลือตัวแปรอิสระยกกำลังที่มีนัยสำคัญ 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าความขุ่น ($\text{Tur}^{2.13}$) สภาพความเป็นด่าง ($\text{Alk}^{9.87}$) ความกระด้าง ($\text{Har}^{5.37}$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าแล้ว $R^2_{\text{adj}} = 0.789$ และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Log}_{10}(\text{Alum Dose}) = 1.101 + 3.26\text{E-}05 \text{Tur}^{2.13} + 1.96\text{E-}023 \text{Alk}^{9.87} + 2.07\text{E-}014 \text{Har}^{5.37} \quad (14)$$

(1) การตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล ด้วยวิธีวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน เริ่มจากการตรวจสอบการแจกแจงของความคลาดเคลื่อน โดยการพล็อตกราฟฮิสโตแกรมของค่า Standardized Residuals และพล็อตกราฟของ Normal probability plot จากภาพผนวกที่ ข4 พบว่ากราฟฮิสโตแกรมมีรูปร่างการแจกแจงปกติ และ กราฟ NP มีลักษณะกระจายเรียงเป็นเส้นตรง แสดงว่า การแจกแจงของความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0 สำหรับการตรวจสอบความเป็นอิสระกันของความคลาดเคลื่อน ใช้วิธีการทดสอบค่าสถิติ Durbin-Watson พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.523 ซึ่งมากกว่า 1.5 แสดงว่า ความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวมีความเป็นอิสระต่อกัน ส่วนการตรวจสอบเกี่ยวกับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนโดยใช้

วิธีการพล็อตกราฟ ระหว่างความคลาดเคลื่อน กับ ค่าทำนายของตัวแปรตาม ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข4 พบว่า การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนอยู่รอบค่า 0 แสดงว่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่

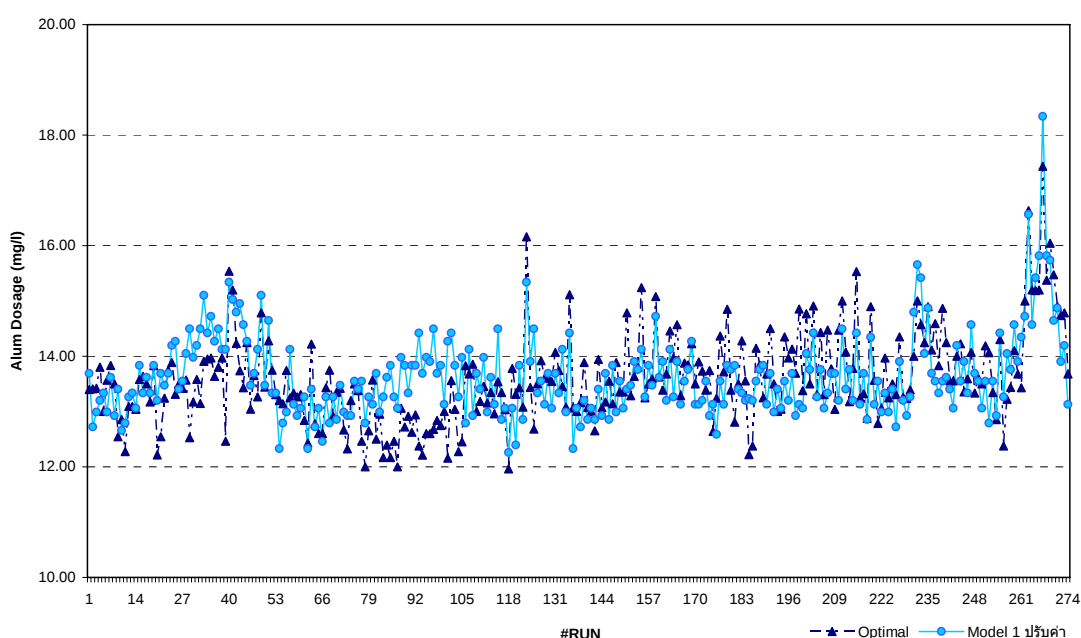
(2) ทดสอบสมการความสัมพันธ์ รูปแบบโมเดลที่ 3 ระหว่าง ปริมาณสารส้มกับค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าความขุ่น สภาพความเป็นด่าง และความกระด้าง โดยนำข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำและปริมาณสารส้มที่เหมาะสมรายวัน จำนวน 274 ตัวอย่าง ทดสอบนำค่าพารามิเตอร์แทนค่าตัวแปรในสมการ หาปริมาณสารส้มที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสมทางทฤษฎีจากการทดลองจาร์เทสต์ ด้วยข้อมูลตารางผนวกที่ ก2 พบว่า จากข้อมูลที่มีการแปลงค่าสารส้มกลับมาเป็นค่าปกติแล้ว มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ 6.86 % พิจารณาเปรียบเทียบปริมาณสารส้มที่ทำนายจากโมเดล 3 กับสารส้มที่เหมาะสม ได้ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 3

4.4 การคัดเลือกโมเดลที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปใช้คาดการณ์ปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมในการทำให้เกิดการตกตะกอนจนค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนลงเหลือ เท่ากับ 5 NTU พบว่า โมเดลที่ 1 มีจำนวนตัวแปรน้อยที่สุด คือ 2 ตัวแปร มีค่า R^2_{adj} น้อยกว่าโมเดลอื่นๆ เพียงเล็กน้อย แต่มีรูปแบบสมการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน จึงสะดวกที่จะนำไปใช้ ถึงจะพบปัญหาที่ค่าความคลาดเคลื่อนสูง แต่เมื่อพิจารณาจาก ภาพที่ 15 เส้นกราฟที่แสดงค่าสารส้มจากการคำนวณด้วย

โมเดลที่ 1 อยู่สูงกว่าเส้นกราฟที่แสดงค่าสารส้มที่เหมาะสมจากการทำจาร์เทสต์ ซึ่งมีความแตกต่างเป็นช่องว่าง(gap)โดยตลอด เมื่อเปรียบเทียบลักษณะกราฟจากโมเดลที่ 1 กับเส้นกราฟที่แสดงค่าสารส้มจากการคำนวณด้วยโมเดลที่ 2 ในภาพที่ 17 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด พบว่า มีรูปแบบเดียวกัน ดังนั้น การใช้โมเดลที่ 1 สามารถทำได้โดยการปรับช่องว่างความแตกต่าง(ปรับ gap) ด้วยค่าคงที่ที่ทำให้เส้นกราฟจากค่าคำนวณใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด คือค่าคงที่เท่ากับ -1.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงด้วยภาพที่ 18 กราฟแสดงปริมาณสารส้มที่คำนวณได้จากการปรับ gap แล้ว เปรียบเทียบกับค่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสมทางทฤษฎีจากการทดลองจาร์เทสต์ โดยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยได้เท่ากับ 4.11% ซึ่งลดลงอย่างมาก ทำให้การนำผลทำนายจากสมการโมเดลที่ 1 ที่แปลงกลับเป็นค่าปริมาณสารส้ม ลบด้วยค่าคงที่ 1.8 เป็นค่าคาดการณ์ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมที่มีความถูกต้องสูง ค่าคลาดเคลื่อนต่ำ เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้จริง ส่วนการพิจารณาสมการโมเดลที่ 2 พบว่า มีจำนวนตัวแปรถึง 3 ตัวแปร และประกอบด้วยจำนวนพจน์ต่างๆ มากถึง 5 พจน์ ทำให้เกิดความสูญเสียในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตัวแปรและการคำนวณมีความยุ่งยาก ถึงจะมีค่า R^2_{adj} สูงที่สุดก็ตาม เช่นเดียวกับกับสมการโมเดลที่ 3 ที่มีการยกกำลังตัวแปรด้วยตัวเลขที่มีจุดทศนิยม มีค่าที่สูง ไม่สะดวกในการคำนวณ ทำให้ไม่เหมาะสมที่นำโมเดลทั้งสองไปใช้งานจริง



ภาพที่ 18 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับผลคำนวณที่ได้จากโมเดลที่ 1 ที่ทำการปรับค่าความแตกต่างด้วยค่าคงที่ -1.8 แล้ว

5. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น

5.1 การเลือกปัจจัย และ กำหนดค่าระดับของปัจจัย ที่จะทำการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย ขั้นตอนนี้เป็น การนำผลวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยการระดมสมอง และวิเคราะห์แผนภูมิเหตุ และผล เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน และคัดเลือกปัจจัยมาทำการทดลองในเบื้องต้นด้วยวิธีการทากูชิ พิจารณาปัจจัยที่ควบคุมได้ 8 ปัจจัย ที่คาดว่าจะมีผลต่อการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน คือ ปริมาณสารส้ม อัตราการผลิต การระบายตะกอน ระยะขนาน้ำในห้องสุญญากาศ เวลาในการปล่อยอากาศ จุดจ่ายสารส้ม การเติมคลอรีนขึ้นต้น เวลาดูดอากาศ และ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ 1 ปัจจัย คือ ค่าความขุ่นน้ำดิบ

5.1.1 อัตราการผลิต จากการที่อัตราการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถังตกตะกอนและเวลาในการกักเก็บน้ำไม่เท่ากัน ซึ่งค่าความสามารถในการปรับอัตราการผลิต คือ ต่ำสุด 2.4 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และสูงสุด 5.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แต่จากสภาพการผลิตในปัจจุบัน ต้องปรับอัตราการผลิตให้รองรับกับปริมาณความต้องการของผู้ใช้น้ำตลอดเวลาและต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จึงมีการปรับอัตราการผลิตอยู่ระหว่าง 3.5 – 5.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังนั้น ในส่วนการกำหนดระดับของปัจจัยจะพิจารณาจากค่าที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน คือ กำหนดระดับสูงที่ค่าอัตราการผลิต 5.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีและกำหนดระดับต่ำที่อัตราการผลิต 3.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

5.1.2 ปริมาณสารส้ม สารเคมีที่ใช้ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีให้เกิดการกำจัดความขุ่นด้วยการตกตะกอน คือ สารส้ม ด้วยการทำให้อนุภาคความขุ่นรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่จนตกตะกอนได้ภายในถังตกตะกอน การตกตะกอนได้ดีขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีที่ใช้ โดยต้องควบคุมค่าความขุ่นของน้ำหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนให้อยู่ในช่วง 5 – 7 NTU จากข้อมูลการทำงานของระบบผลิตปัจจุบัน จำเป็นต้องใช้ปริมาณสารส้มประมาณ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการควบคุมความขุ่น จึงพิจารณากำหนดค่าระดับปัจจัยโดยการเพิ่มและลดค่าปริมาณสารส้มให้แตกต่างจากค่าที่ใช้ในปัจจุบันอีก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคาดว่าจะสามารถแสดงผลกระทบที่ชัดเจนได้ โดยไม่สูงหรือต่ำเกินไปและสะดวกในการปรับการจ่าย คือ กำหนดระดับสูงที่ค่าปริมาณสารส้ม 35 มิลลิกรัมต่อลิตรและ กำหนดระดับต่ำที่ค่าปริมาณสารส้ม 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.3 จุดจ่ายสารส้ม จากการที่ขั้นตอนการกวนเร็ว เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างสารส้มกับน้ำดิบอย่างรวดเร็ว มีกระจายตัวส้มฝัสน้ำดิบดีที่สุด จึงจะทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย เพื่อสร้างตะกอนให้ได้ปริมาณมากขึ้น การเลือกจุดจ่ายสารส้มที่เหมาะสมมีการกระจายสารส้มได้ดี ตลอดจนสร้างเวลาการผสมที่แตกต่างกัน จึงมีความสำคัญมากในการพิจารณาลักษณะการจ่ายสารส้ม จากระบบการผลิตของ ถึงตกตะกอนนี้ มีจุดสำหรับให้เลือกจ่ายสารส้มอยู่ 2 จุด ได้แก่ ที่รางรับน้ำดิบ มีลักษณะการจ่ายตามขวางการไหลของน้ำและอยู่ใกล้จุดการกวนเร็วกว่า ส่วนที่จุดจ่ายที่อาคารเติมอากาศ มีลักษณะการจ่ายตามแนวการไหลของน้ำและอยู่ห่างจากจุดการกวนเร็ว ดังนั้น จึงพิจารณากำหนดระดับของปัจจัย คือ กำหนดระดับสูงที่รางรับน้ำดิบ และกำหนดระดับต่ำที่อาคารเติมอากาศ

5.1.4 การเติมคลอรีนขึ้นต้น จากทฤษฎีทางเคมีเกี่ยวกับการตกตะกอนของน้ำ พบว่าการเติมคลอรีนขึ้นต้นมีส่วนช่วยในการตกตะกอนกำจัดความขุ่นหรือไม่ ยังไม่ปรากฏผลการวิจัยที่ชัดเจน แต่อาจมีส่วนช่วยในการตกตะกอน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากเป้าหมายหลักในการเติมเพื่อฆ่าสิ่งมีชีวิตเล็กๆทั้งพืช สัตว์และออกซิเจนกำจัดโลหะออกจากน้ำดิบภายในถังตกตะกอน อีกทั้งการเติมคลอรีนที่มีค่าความเป็นกรดเข้มข้นลงไปผสมในน้ำ จะทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจากสภาพการผลิตปัจจุบัน มีการเติมคลอรีนขึ้นต้นเป็นบางช่วงเวลาตามสภาพน้ำดิบและ บางครั้งมีการเติมคลอรีนขึ้นต้นเพื่อช่วยแก้ปัญหาการตกตะกอนกำจัดความขุ่นเมื่อน้ำหลังผ่านการตกตะกอนมีค่าความขุ่นสูง จึงคาดว่า การเติมคลอรีนส่งผลต่อความขุ่นจากคุณสมบัติดังกล่าวและเพื่อทำการหาผลจากการเติมคลอรีนที่ชัดเจน จึงพิจารณากำหนดระดับของปัจจัย คือ กำหนดระดับสูงที่การเติมคลอรีนขึ้นต้น และ กำหนดระดับต่ำที่การไม่เติมคลอรีนขึ้นต้น

5.1.5 ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ มีรายละเอียดการปรับตั้งค่าระยะขกน้ำหรือ ความสูงของระดับน้ำในห้องสุญญากาศเพื่อสร้างอัตราพัลเซชัน(Pulsation Rate) ให้เหมาะสมตามความเร็วของอัตราน้ำล้นผิวและความแรงในการปล่อยน้ำตกลงมา จนเกิดการรวมตะกอน Flocculation ที่เหมาะสม จากคู่มือสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ระดับต่ำที่สุด 0.15 เมตร จนถึงระดับสูงที่สุด 0.65 เมตร เหนือระดับผิวน้ำภายในห้องสุญญากาศ ซึ่งสภาพการทำงานในปัจจุบันของระบบผลิต มีการกำหนดระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศคงที่ไว้ 0.45 เมตร ตลอดทุกช่วงการผลิต ดังนั้นในส่วนการกำหนดระดับของปัจจัย จะพิจารณาจากค่าที่เคยปรับตั้งใช้งานจริงที่ผ่านมา โดยเลือกให้เพิ่มระยะขกไปจากเดิมไม่มาก เพื่อไม่ให้เกิดพัลเซชันแรงเกินไป คือ กำหนดระดับสูงที่ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ 0.55 เมตร แต่จะทำการลดระยะขกไปจากค่าปัจจุบันค่อนข้างมาก เพื่อดูผลการพัลเซชันที่เบา จึงกำหนดระดับต่ำที่ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ 0.20 เมตร

5.1.6 เวลาในการดูดอากาศ มีรายละเอียดการปรับตั้งค่าเวลาในการดูดอากาศ เพื่อสร้างความเป็นสุญญากาศจนกระทั่งน้ำภายในห้องสุญญากาศให้ได้ระดับที่กำหนดและเป็นการกำหนดความถี่ในการสร้างอัตราพัลเซชั่น โดยควบคุมจากการปรับวาล์วหน้าพัดลมดูดอากาศ ซึ่งกำหนดว่าระยะเวลาในการดูดอากาศต้องไม่เร็วจนจุดชื้นตะกอนภายในถัง ย้อนกลับเข้าไปสู่ห้องสุญญากาศ จากสภาพการทำงานปัจจุบันมีการกำหนดระยะเวลาการดูดอากาศอยู่ในช่วง 30 – 50 วินาที ดังนั้นในส่วนการกำหนดระดับของปัจจัยจะพิจารณาจากค่าที่ใช้งานจริงที่ผ่านมา คือ กำหนดระดับสูงที่ระยะเวลาการดูดอากาศ 50 วินาที ซึ่งสามารถหรีวาล์วของพัดลมดูดอากาศได้น้อยที่สุดและกำหนดระดับต่ำที่ระยะเวลาการดูดอากาศ 30 วินาที เพื่อไม่ให้เกิดการดูดตะกอนย้อนกลับได้

5.1.7 เวลาในการปล่อยอากาศ รายละเอียดการปรับตั้งค่าเวลาในการปล่อยอากาศ เพื่อเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปแทนที่สุญญากาศในห้องสุญญากาศ เป็นการปล่อยน้ำที่ได้ทำการยกระดับไว้แล้วให้ตกลงมาอย่างรวดเร็วตามเวลาที่ตั้งไว้จนระดับน้ำลดลงจนถึงระดับปกติ และเป็นการกำหนดเร็ว ความรุนแรงในการสร้างอัตราพัลเซชั่น ซึ่งสามารถกำหนดระยะเวลาในการปล่อยอากาศด้วยตัวตั้งเวลา(Timer) และจากคู่มือกำหนดว่าระยะเวลาในการปล่อยอากาศไม่ควร เกิน 15 วินาที ซึ่งสภาพการทำงานในปัจจุบัน มีการกำหนดระยะเวลาการปล่อยอากาศอยู่ในช่วง 6 – 12 วินาที โดยส่วนมากจะกำหนดค่าอยู่ที่ 10 วินาที ดังนั้นในส่วนการกำหนดระดับของปัจจัยจะพิจารณาจากค่าที่เคยใช้งานปัจจุบัน คือ กำหนดระดับสูงที่ระยะเวลาการปล่อยอากาศ 12 วินาที และกำหนดระดับต่ำที่ระยะเวลาการปล่อยอากาศ 6 วินาที

5.1.8 ความถี่การระบายตะกอนหรือเวลาที่ช่วงการระบายตะกอนแต่ละครั้งของวาล์วระบายตะกอน มีรายละเอียดการปรับตั้งค่าระยะเวลาความถี่การระบายตะกอนส่วนเกินออกจากถังตกตะกอน เพื่อไม่ให้เกิดตะกอนสะสมภายในถังจนตะกอนฟุ้งกระจายกรณีระบายน้อยเกินไป หรือระบายออกมากเกินไปจนเสียสมดุลของอัตราการไหลของน้ำและชั้นตะกอน ความถี่การระบายตะกอนเป็นการกำหนดน้ำสูญเสียจากการระบายตะกอนทิ้ง ซึ่งต้องกำหนดควบคู่ไปกับระยะเวลาการเปิดวาล์วระบายตะกอน โดยระยะเวลาเปิดวาล์วและความถี่ในการระบายตะกอนควบคุมด้วย Timer ซึ่งสภาพการทำงานในปัจจุบัน มีการกำหนดระยะเวลาการเปิดวาล์วระบายตะกอน อยู่ในช่วง 12 – 36 วินาที ในการทดลองจึงต้องกำหนดให้เวลาเปิดวาล์วคงที่เป็น 24 วินาที และปัจจัยความถี่การระบายตะกอนแต่ละท่อ อยู่ในช่วง 120 – 540 วินาที ดังนั้นในส่วนการกำหนดระดับของปัจจัย จะพิจารณาจากค่าที่ใช้งานปัจจุบัน คือ กำหนดระดับสูงที่ระยะเวลาความถี่การระบายตะกอน 540 วินาที และกำหนดระดับต่ำที่ระยะเวลาความถี่การระบายตะกอน 120 วินาที

5.1.9 ความขุ่นน้ำดิบ เป็นพารามิเตอร์คุณภาพน้ำสำคัญ และเป็นค่าที่ต้องทำให้ลดลง เมื่อผ่านการตกตะกอน พิจารณาจากช่วงที่ทำการทดลอง ซึ่งคาดการณ์ว่าความขุ่นน้ำดิบจะเปลี่ยนแปลงมีค่าสูงต่ำจาก 30 NTU ไม่มาก เหมือนในช่วงเวลาที่ผ่านมา ดังนั้นในส่วนการกำหนดระดับของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้นี้ จะพิจารณาจากค่าที่เป็นไปได้ คือ กำหนดระดับสูงที่ความขุ่นน้ำดิบ อยู่ในช่วง 30 – 40 NTU และกำหนดระดับต่ำที่ความขุ่นน้ำดิบ อยู่ในช่วง 20 – 30 NTU

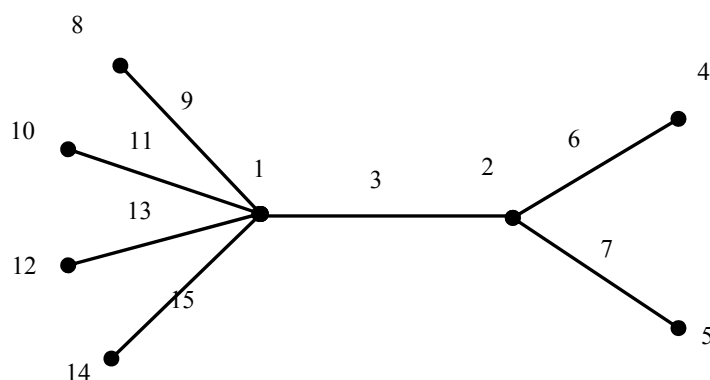
กำหนดปัจจัยทั้งหมดแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ที่ระดับต่ำ (1) และ ที่ระดับสูง (2) โดยค่าที่กำหนดให้ในแต่ละระดับของปัจจัย นำมาจากค่าของปัจจัยที่ใช้ในระบบการผลิตน้ำประปาจริง ซึ่งอ้างอิงจากคู่มือการใช้งานถึงตกตะกอนแบบมีชั้นสลิคจ์ รุ่น Pulsator ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงจำนวนปัจจัยและระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองขั้นต้น

ปัจจัย	ตัวแปร	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	หน่วย
ปัจจัยที่ควบคุมได้				
อัตราการผลิต	A	3.5	5.0	ลบ.ม/วินาที
ปริมาณสารส้ม	B	25	35	กก. / ลิตร
จุดจ่ายสารส้ม	C	อาคารเดิมอาคาร	รางรับน้ำดิบ	-
การเติมคลอรีนขั้นต้น	D	ไม่เติม	เติม	-
ระยะยกน้ำในห้องสุญญากาศ	E	0.20	0.55	เมตร
เวลาในการดูดอากาศ	F	30	50	วินาที
เวลาในการปล่อยอากาศ	G	6	12	วินาที
ความถี่การระบายตะกอน	H	120	540	วินาที
ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้				
ความขุ่นน้ำดิบ	T	ต่ำ (20 - 30)	สูง (30-40)	NTU

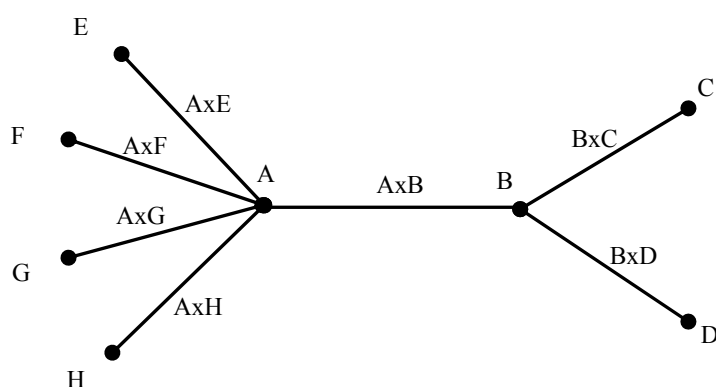
5.2 การออกแบบการทดลอง วางแผนออกแบบด้วยวิธีทากูชิ โดยใช้ ตาราง Orthogonal Array แบบ $L_{16} 2^{15}$ และกราฟเส้นตรงสำหรับพิจารณากำหนดปัจจัย แสดงดังภาพที่ 19 ในการออกแบบ และทำการทดลอง 2 ชั่วโมง รวมทำการทดลอง 64 ครั้ง ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่คัดเลือกมาทำการทดลองเบื้องต้น เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าความขุ่นของน้ำหลังการตกตะกอน

ออกไป โดยพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller The Better)



ภาพที่ 19 กราฟเส้นตรงสำหรับการออกแบบการทดลองทางสถิติ ตาราง $L_{16} 2^{15}$ ที่นำมาพิจารณา

จากภาพที่ 19 แสดงรูปแบบ และตัวเลขคอถัมภ์ ของกราฟเส้นตรง สำหรับปัจจัยหลัก และผลกระทบร่วมสองปัจจัยที่คัดเลือกมา ใช้คู่กับตาราง แบบ $L_{16} 2^{15}$ นำมาพิจารณาจัดปัจจัยที่ต้องการศึกษาผลกระทบร่วม โดยแบ่งปัจจัยหลักที่ต้องการศึกษาผลกระทบร่วมกับปัจจัยหลักอื่นๆ คือ ปัจจัยอัตราการผลิต(A) กับปัจจัยปริมาณสารส้ม(B) ดังแสดงในภาพที่ 20 จากนั้นนำปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมลงในตารางตามเลขคอถัมภ์ที่กำหนดไว้ในกราฟเส้นตรง ดังตารางที่ 5



ภาพที่ 20 กราฟเส้นตรงกำหนดตำแหน่งของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 5 แสดงปัจจัยและระดับทั้งหมด ตามแผนการทดลองทางสถิติ แบบ $L_{16} 2^{15}$

Run	Inner array (Control factors)															Outer array (Noise factor)	
	ปัจจัยที่กำหนด															ความชื้นน้ำดิบ T	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	(1) ต่ำ	(2) สูง
	A	B	A×B	C	D	B×C	B×D	E	A×E	F	A×F	G	A×G	H	A×H		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2		
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2		
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1		
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2		
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1		
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1		
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2		
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1		
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1		
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2		
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1		
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2		
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2		
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1		

5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองขั้นต้นด้วยวิธีทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางผนวกที่ ค1 การทดลองประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุมได้ 8 ปัจจัย และควบคุมไม่ได้ 1 ปัจจัย

5.3.1 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาจากตารางผลตอบสนองค่า S/N Ratios จากโปรแกรม เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผล คัดเลือกปัจจัยและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่า S/N Ratio กรณีน้อยกว่าดีกว่า แสดงดังตารางที่ 6

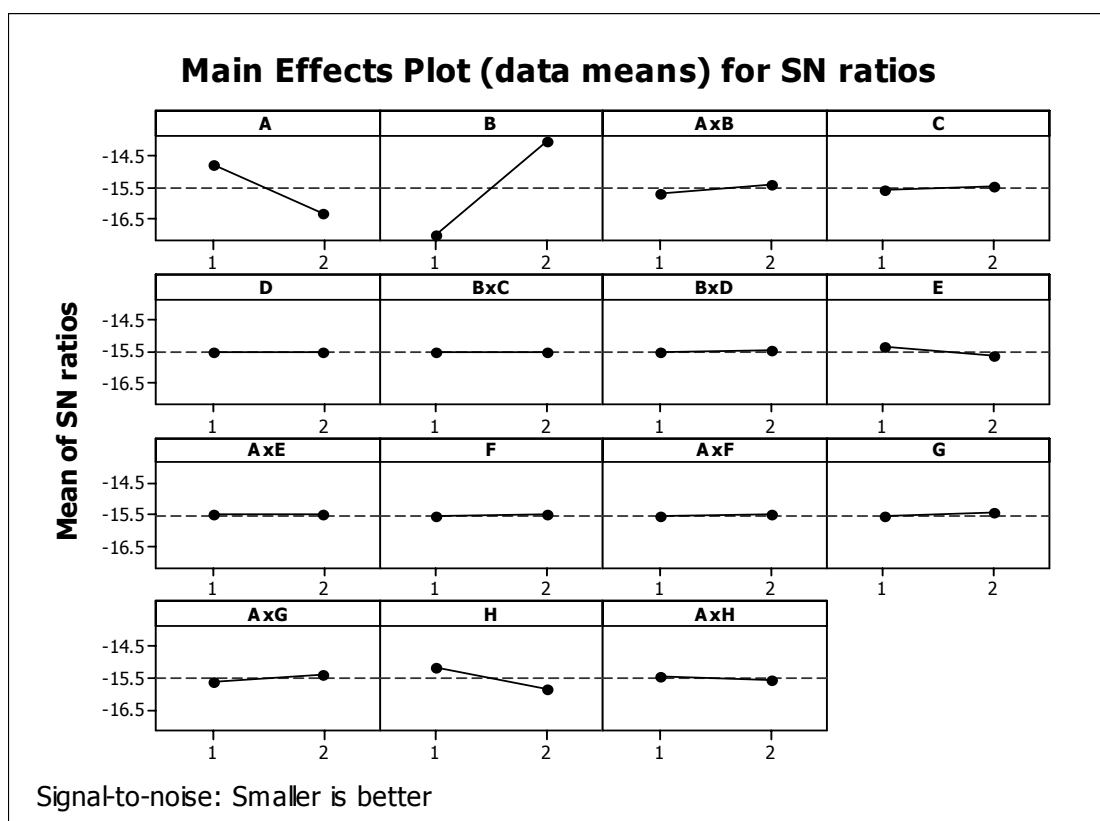
ตารางที่ 6 ผลตอบสนองสำหรับค่า S/N Ratio ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม (กรณีน้อยกว่าดีกว่า: Smaller The Better)

Level	A	B	A×B	C	D	B×C	B×D	E
1	-14.74	-17.00	-15.66	-15.57	-15.52	-15.50	-15.54	-15.37
2	-16.30	-14.03	-15.38	-15.47	-15.51	-15.53	-15.49	-15.66
Delta	1.56	2.97	0.28	0.10	0.01	0.03	0.05	0.29
Rank	2	1	5	8	15	14	11	4
Level	A×E	F	A×F	G	A×G	H	A×H	
1	-15.50	-15.54	-15.54	-15.57	-15.62	-15.18	-15.47	
2	-15.53	-15.49	-15.49	-15.46	-15.41	-15.85	-15.57	
Delta	0.04	0.05	0.05	0.12	0.20	0.67	0.10	
Rank	13	12	10	7	6	3	9	

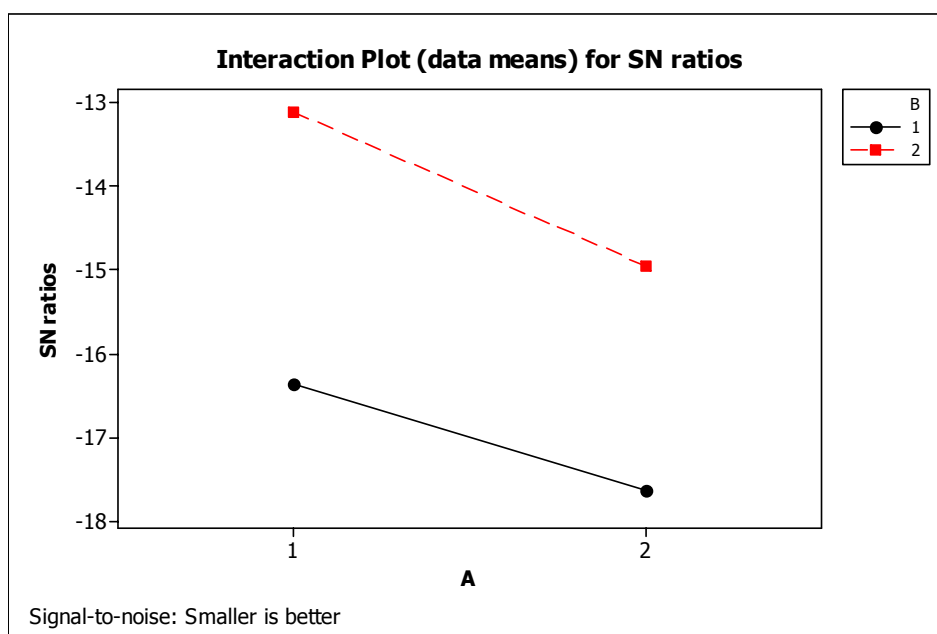
การทดลองจากวิธีทางสถิติ พิจารณาจากตารางที่ 6 พบว่าผลการวิเคราะห์ แสดงค่าความแตกต่าง(Delta) บอกขนาดอิทธิพลของแต่ละปัจจัย และเรียงลำดับ Rank จากปัจจัยที่ส่งผลมากไปปัจจัยที่ส่งผลน้อย ในส่วน Signal to Noise Ratios ของแต่ละระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม โดยปัจจัยที่มีค่า Delta มากส่งผลมาก คือ ปัจจัยปริมาณสารส้ม(B) ส่งผลต่อค่าความขุ่นมากที่สุด โดยปริมาณสารส้มที่ระดับสูง(ค่า S/N Ratio มาก) ทำให้ได้น้ำที่ความขุ่นต่ำกว่า ลำดับถัดมา

คือ ปัจจัยอัตราการผลิต(A) ที่ระดับปัจจัยต่ำ ค่าความขุ่นน้ำจะต่ำกว่า ปัจจัยที่ส่งผลมากลำดับถัดมา คือ ปัจจัยการระบายตะกอน(H) ที่ระดับปัจจัยต่ำจะให้ผลที่ดีกว่า ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมาทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลกระทบต่อค่าความขุ่นน้ำที่ผ่านการตกตะกอนอย่างมาก จากค่าDelta ที่มากเป็นสามลำดับแรก ส่วนปัจจัยอื่นๆ ค่า Delta น้อยกว่ามาก แสดงว่าส่งผลกระทบต่อค่าความขุ่นน้ำไม่มากนัก ซึ่งเรียงลำดับตามการส่งผลหรือตามค่า Delta ได้ดังนี้คือ ปัจจัยระยะย่น้ำในห้องสุญญากาศ(E) ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการผลิตกับปริมาณสารส้ม($A \times B$) ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการผลิตกับเวลาในการปล่อยอากาศ($A \times G$) เวลาในการปล่อยอากาศ(G) จุดจ่ายสารส้ม(C) ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการผลิตกับการระบายตะกอน($A \times H$) ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการผลิตกับเวลาการดูดอากาศ($A \times F$) ปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับการเติมคลอรีนขึ้นต้น($B \times D$) เวลาการดูดอากาศ(F) ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการผลิตกับระยะย่น้ำในห้องสุญญากาศ($A \times E$) ปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับจุดจ่ายสารส้ม($B \times C$) และลำดับสุดท้ายส่งผลน้อยที่สุดคือ การเติมคลอรีนขึ้นต้น(D) เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ พบว่าค่าเฉลี่ยความขุ่นของน้ำภายหลังการตกตะกอนจากช่วงความขุ่นน้ำดิบที่ระดับ 1 มีค่าต่ำกว่า ค่าเฉลี่ยความขุ่นของน้ำภายหลังการตกตะกอน จากช่วงความขุ่นน้ำดิบที่ระดับ 2 อยู่เล็กน้อย

5.3.2 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาจาก Factorial Plots เพื่อกำหนดค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่จะให้ได้ค่า S/N Ratio (กรณีน้อยกว่าดีกว่า) ที่สูง ดังภาพที่ 21 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ทำการศึกษา จากกราฟแสดงให้เห็นผลเช่นเดียวกันกับผลของตารางผลตอบสนองสำหรับค่า S/N Ratio (กรณีน้อยกว่าดีกว่า: Smaller The Better) โดยพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟ ได้ที่มีผลมาก 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยปริมาณสารส้ม(B) ส่งผลต่อค่าความขุ่นมากที่สุด สืบเนื่องจากความชันที่มาก ลำดับถัดมาคือ ปัจจัยอัตราการผลิต(A) ปัจจัยการระบายตะกอน(H) ส่วนปัจจัยอื่นๆ ความชันต่ำใกล้เคียงกันแสดงว่าส่งผลน้อยมาก และปัจจัยร่วมที่มีผลมากที่สุด คือ ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการผลิตกับปริมาณสารส้ม($A \times B$) ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 21 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมทั้งหมด 15 ปัจจัย ด้วย S/N Ratio



ภาพที่ 22 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A กับ B

จากภาพที่ 22 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการผลิตกับปริมาณสารส้ม (AB) ส่งผลเล็กน้อย โดยที่อัตราการผลิตต่ำปริมาณสารส้มสูง ส่งผลให้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด ส่วนปัจจัยร่วมอื่นๆ เมื่อเทียบกับปัจจัย AB แล้วไม่มีผล

การเลือกปัจจัยที่ส่งผล เพื่อไปใช้ในการทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปนั้น พิจารณาจากตารางที่ 6 ในค่า Delta ต้องมากกว่า 0.1 ได้แก่ ลำดับ (Rank) ที่ 1 ถึง 7 ประกอบด้วย 5 ปัจจัยหลัก คือ อัตราการผลิต ปริมาณสารส้ม ระยะยกน้ำในห้องสุญญากาศ เวลาในการปล่อยอากาศ ความถี่การระบายตะกอน และทำการตัดปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบท่อค่าความขุ่นน้อยมากออกไป

5.4 ผลการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

เนื่องจากผลการทดลองเบื้องต้น โดยใช้วิธีทางสถิติจากการวิเคราะห์กราฟและตารางผลตอบสนองสำหรับค่า S/N Ratios พบว่าปัจจัยที่ส่งผลสูงต่อการตกตะกอนที่นำมาทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเบื้องต้น เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลมาทำการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต พบว่า ในการทดลองขั้นต้น ปัจจัยอัตราการผลิตส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอย่างมาก มีผลกระทบร่วมกับปัจจัยปริมาณสารส้ม ดังนั้นจึงต้องทำการแยกปัจจัยอัตราการผลิตมาทำการทดลองเป็นแผนอัตราการผลิตต่ำและอัตราการผลิตสูง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมไปใช้งานจริงในระบบการผลิตที่กำหนดให้มีอัตราการผลิตน้ำได้ 2 ระดับ จากนั้นนำปัจจัยที่เหลืออีก 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณสารส้ม ระยะยกน้ำในห้องสุญญากาศ เวลาในการปล่อยอากาศ ความถี่การระบายตะกอน มาทำการออกแบบการทดลอง ดังนั้นในการกำหนดระดับของปัจจัยแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต จึงได้มีการปรับค่าระดับของปัจจัยให้ละเอียดขึ้นในบางปัจจัย คือ ปัจจัยปริมาณสารส้ม ระยะยกน้ำในห้องสุญญากาศ ความถี่การระบายตะกอน เพื่อให้เหมาะสมในศึกษาผลกระทบมากยิ่งขึ้น และกำหนดระดับของปัจจัยให้ออกนอกช่วงที่เคยทำการทดลอง คือ ปัจจัยเวลาในการปล่อยอากาศ โดยสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาคือ ต้องสามารถปรับตั้งได้จริงและไม่ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์มากเกินไป จนอาจทำให้ส่งผลเสียต่อคุณภาพน้ำประปาได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ออกไปนอกช่วงที่เคยใช้งานจริงเพียงเล็กน้อย เมื่อแบ่งการทดลองเป็นที่อัตราการผลิตต่ำ 3.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และ ที่อัตราการผลิตสูง 5.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในแต่ละช่วงความขุ่นน้ำดิบมาทำการออกแบบการทดลอง โดยขณะทดลองได้ควบคุมปัจจัยอื่นๆ ดังนี้ เลือกจุลเจายสารส้มที่วางรับน้ำดิบตลอด เนื่องจากให้ผลความขุ่นน้ำที่ต่ำกว่า เวลาการดูดอากาศเลือกเป็น 45 วินาที เนื่องจากเป็นค่าตรงกลางของระดับการทดลองที่ผ่านมา

และไม่เติมคลอรีนขึ้นต้น เนื่องจากไม่ส่งผลต่อการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่น มีราคาสูงและเหมาะสมที่จะใช้ป้องกันการเกิดสาหร่าย ลดกลิ่นและสีของน้ำเท่านั้น

5.4.1 แผนอัตราการผลิตต่ำ (3.5 ลบ.ม./วินาที) ซึ่งกำหนดระดับของปัจจัยต่างๆ ที่ได้ทำการทดลองแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงระดับของปัจจัยที่อัตราการผลิตต่ำ สำหรับแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

ปัจจัย	ตัวแปร	ระดับปัจจัย				
		-2	-1	0	1	2
ปริมาณสารส้ม (B)	Dose	20	23	26	29	32
ระยะยกน้ำห้องสุญญากาศ (E)	Height	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65
เวลาการปล่อยอากาศ (G)	Flush	3	6	9	12	15
ความถี่ระบายตะกอน (H)	Drain	120	240	360	480	600

การออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลอง CCD สำหรับที่อัตราการผลิตต่ำ มีปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 4 ปัจจัย คือ Dose , Height , Flush , Drain ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลองทางสถิติ สำหรับแผนการทดลองแบบ CCD นี้ ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง ผลการทดลองที่ได้ในช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 25 – 40 NTU และช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU แสดงดังตารางผนวกที่ ค2 และ ค3 ซึ่งจุดของการออกแบบประกอบไปด้วย

- Factorial Points จำนวน $2^k = 2^4 = 16$ ตัวอย่าง

$$\begin{aligned}
 \text{- Center Points} \quad (n_0) &= \left\{ 0.8386 \left(\sqrt{2^k + 2} \right)^2 - 2^k - 2k \right\} \\
 &= \left\{ 0.8386 \left(\sqrt{2^4 + 2} \right)^2 - 2^4 - 2(4) \right\} = 6.1896 \approx 7
 \end{aligned}$$

- Star Points จำนวน $2k = 2 \times 4 = 8$ ตัวอย่าง โดยแต่ละจุดของ Star Points อยู่ห่างจาก Center Points ด้วยระยะที่เท่ากัน คือ α โดย $\alpha = \sqrt[4]{2^4} = 2$

ก. ช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 25 – 40 NTU

1) การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตรากาการผลิตต่ำ
แสดงผลการวิเคราะห์ ดังนี้

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตรากาการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่น
น้ำดิบ 25 - 40 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.25714	105.106	0.000
Dose	-1.33958	-49.591	0.000
Height	0.36875	13.651	0.000
Flush	-0.32917	-12.186	0.000
Drain	0.20833	7.712	0.000
Dose*Dose	0.11228	4.537	0.000
Height*Height	0.02790	1.127	0.265
Flush*Flush	0.29665	11.987	0.000
Drain*Drain	0.02165	0.875	0.386
Dose*Height	0.05313	1.606	0.115
Dose*Flush	0.17500	5.290	0.000
Dose*Drain	0.01875	0.567	0.574
Height*Flush	-0.25313	-7.651	0.000
Height*Drain	0.02813	0.850	0.400
Flush*Drain	-0.01250	-0.378	0.707

จากตารางที่ 8 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำภายหลังการตกตะกอน ซึ่งค่า P – Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม(Dose) ระยะขุ่นน้ำห้องสุญญากาศ(Height) เวลาในการปล่อยอากาศ(Flush) ความถี่การระบายตะกอน(Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม(Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ(Flush*Flush) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ(Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะขุ่นน้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Height*Flush)

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับแผนอัตราการผลิตต่ำ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 1) (ช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 25 – 40 NTU) เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำดิบหลังการตกตะกอน จากการทดลองแบบ CCD มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อ เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความขุ่นน้ำดิบที่ได้ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความขุ่นน้ำดิบหลังผ่านการตกตะกอน แสดงผล ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.3029	145.012	0.000
Dose	-1.3396	-49.773	0.000
Height	0.3687	13.701	0.000
Flush	-0.3292	-12.230	0.000
Drain	0.2083	7.741	0.000
Dose*Dose	0.1075	4.406	0.000
Flush*Flush	0.2919	11.961	0.000
Dose*Flush	0.1750	5.309	0.000
Height*Flush	-0.2531	-7.679	0.000

ตารางที่ 10 Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ค่าสังเกตที่	ค่าความขุ่นน้ำดิบ (Ytur)	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)	Standardized Residual
30	8.000	8.376	-0.376	-2.21 R
23	7.450	7.129	0.321	2.03 R
6	6.250	5.720	0.530	3.04 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

จากตารางที่ 9 ถึง 10 เนื่องจากค่าสังเกต Unusual Observations ที่แสดงเป็นค่าที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยอย่างมาก จึงทำการตัดค่าสังเกตเหล่านี้ออก แล้วทำการวิเคราะห์การถดถอยใหม่ จนได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.3176	203.052	0.000
Dose	-1.3676	-75.762	0.000
Height	0.3968	21.981	0.000
Flush	-0.3440	-17.799	0.000
Drain	0.1177	5.327	0.000
Dose*Dose	0.1174	7.290	0.000
Flush*Flush	0.2821	15.654	0.000
Dose*Flush	0.2171	9.572	0.000
Height*Flush	-0.2952	-13.017	0.000
S = 0.1184 R-Sq = 99.3% R-Sq(adj) = 99.2%			

จากตารางที่ 11 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน (Y_{tur}) ซึ่งมีค่า P – Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม(Dose) ระยะขกน้ำห้องสุญญากาศ(Height) เวลาในการปล่อยอากาศ(Flush) ความถี่การระบายตะกอน(Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม(Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ(Flush*Flush) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ(Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะขกน้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ(Height*Flush) และได้สมการถดถอย ดังนี้

$$\hat{Y}_{tur} = 5.3176 - 1.3676 \text{ Dose} + 0.3968 \text{ Height} - 0.3440 \text{ Flush} + 0.1177 \text{ Drain} + 0.1174 \text{ Dose}^2 + 0.2821 \text{ Flush}^2 + 0.2171 \text{ Dose*Flush} - 0.2952 \text{ Height*Flush} \quad (15)$$

(1) การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ (Lack of Fit Test)

มีสมมติฐาน คือ H_0 : รูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสม

H_1 : รูปแบบการถดถอยที่ได้ไม่เหมาะสม

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ
ถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

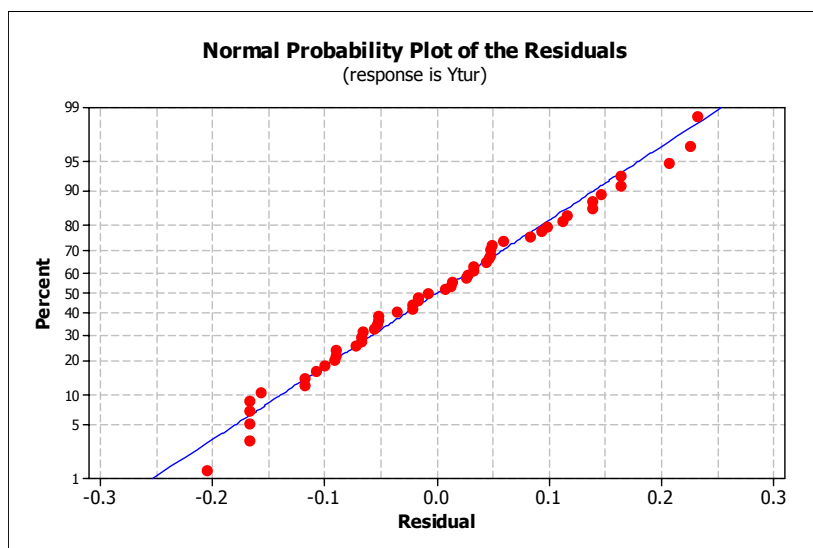
แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลัง สอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Regression	87.5063	8	10.9383	780.40	0.000
Linear	80.8802	4	21.3606	1523.99	0.000
Square	3.4137	2	1.9304	137.73	0.000
Interaction	3.2124	2	1.6062	114.59	0.000
Residual Error	0.6167	44	0.0140		
Lack - of - Fit	0.2774	13	0.0213	1.95	0.063
Pure Error	0.3393	31	0.0109		
Total	88.1230	52			

จากตารางที่ 12 จะเห็นได้ว่า ค่า P – Value ของ Lack of Fit = 0.063
ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แสดงว่ารูปแบบการถดถอย
ที่ได้ มีความเหมาะสม

(2) ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

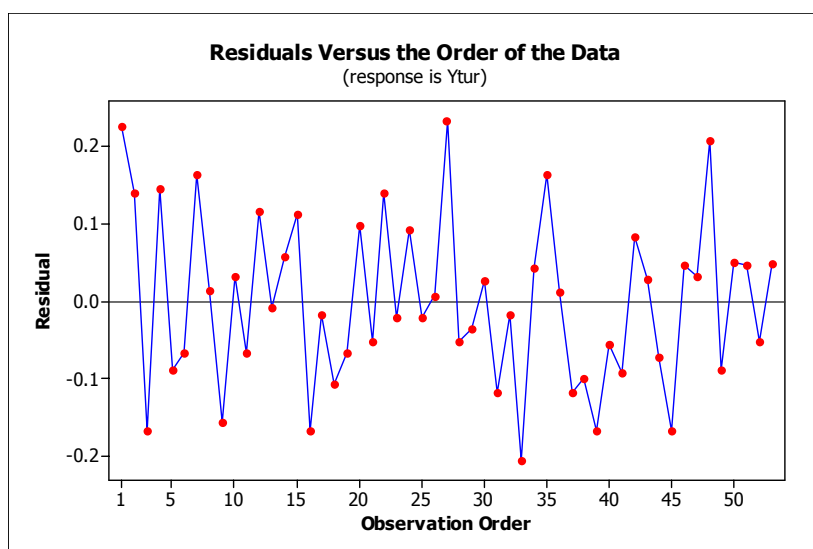
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้
มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งหมายความว่ารูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ
โดยอาศัยค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ในการวิเคราะห์ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดย
การตรวจสอบมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่า เป็นแบบแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยใช้การพล็อตค่าคลาดเคลื่อนผ่านกระดาษความน่าจะเป็นสำหรับการแจกแจงปกติ
โดยพิจารณาจากการกระจายของจุดค่าคลาดเคลื่อนที่พล็อตลงไป ดังภาพที่ 23 พบว่า ข้อมูลมีการ
ตกและกระจายตัวใกล้เคียงตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ



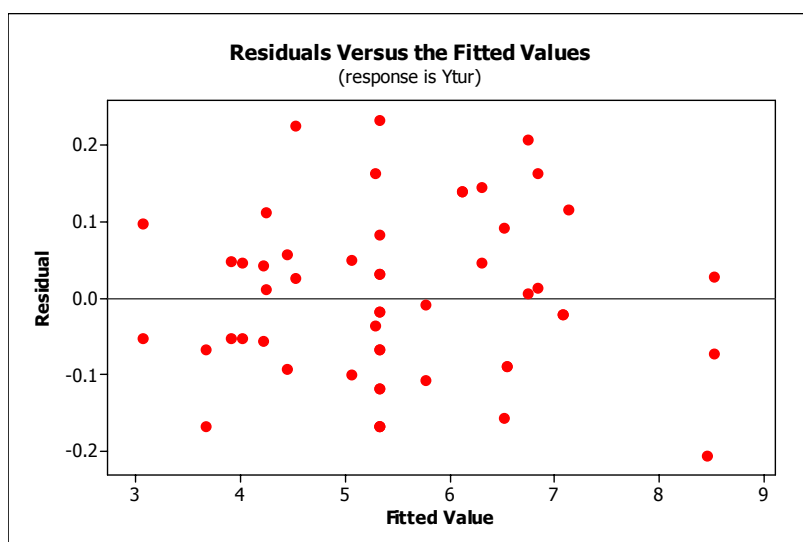
ภาพที่ 23 กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตรการผลิตต่ำ
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ(Independent) ของข้อมูล พิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของจุดค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับ ดังภาพที่ 24 พบว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบ แสดงว่า ค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 24 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตรการผลิตต่ำ
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

3. การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย พล็อตค่าคลาดเคลื่อน กับ ค่าประมาณข้อมูล (Fitted Value) ดังภาพที่ 25 พบว่า การกระจายตัวของจุด ไม่เป็นรูปแบบ คือ ไม่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นรูปโทรโข่ง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลที่ได้ มีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 25 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

3) หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25-40 NTU

หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยใช้การวิเคราะห์กราฟหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด กรณีค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว มีค่าเท่ากับเป้าหมายที่ต้องการเป็น 6 NTU จากวิธี Response Optimization ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากรูปแบบสมการ

$$\hat{Y}_{tur} = 5.3176 - 1.3676 \text{ Dose} + 0.3968 \text{ Height} - 0.3440 \text{ Flush} + 0.1177 \text{ Drain} + 0.1174 \text{ Dose}^2 + 0.2821 \text{ Flush}^2 + 0.2171 \text{ Dose} * \text{Flush} - 0.2952 \text{ Height} * \text{Flush} \quad (16)$$

และกำหนดให้

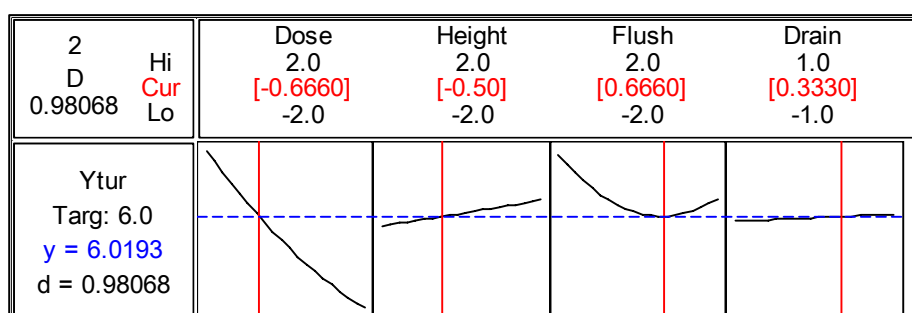
ปริมาณสารส้ม (Dose) มีค่าอยู่ระหว่าง 20 - 32 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะยกน้ำห้องสุญญากาศ (Height) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.25 - 0.65 เมตร

เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) มีค่าอยู่ระหว่าง 3 - 15 วินาที

ความถี่การระบายตะกอน (Drain) มีค่าอยู่ระหว่าง 240 - 480 วินาที

ผลจากการใช้วิธี Response Optimization แสดงในภาพที่ 26 พิจารณาได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในที่นี้ คือ ค่าความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอน (Y_{tur}) มีค่าเท่ากับ 6.0193 NTU และได้ค่าของปัจจัยต่างๆ ดังนี้ Dose = 24 มิลลิกรัมต่อลิตร , Height = 0.40 เมตร , Flush = 11 วินาที , Drain = 400 วินาที



ภาพที่ 26 กราฟ Response Optimization แผนอัตรการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ข. ช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 45 – 60 NTU

1) การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตรการผลิตต่ำ
แสดงผลการวิเคราะห์ ดังนี้

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตรการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.63571	66.979	0.000
Dose	-1.39375	-30.671	0.000
Height	0.39375	8.665	0.000
Flush	-0.39792	-8.757	0.000

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Drain	0.20208	4.447	0.000
Dose*Dose	0.11972	2.876	0.011
Height*Height	0.01972	0.474	0.642
Flush*Flush	0.27597	6.629	0.000
Drain*Drain	-0.04903	-1.178	0.256
Dose*Height	0.07812	1.404	0.180
Dose*Flush	0.22187	3.987	0.001
Dose*Drain	0.00937	0.168	0.868
Height*Flush	-0.25937	-4.660	0.000
Height*Drain	0.04063	0.730	0.476
Flush*Drain	-0.00313	-0.056	0.956

จากตารางที่ 13 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำภายหลังการตกตะกอน ซึ่งค่า P – Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม(Dose) ระยะยกลน้ำห้องสุญญากาศ(Height) เวลาในการปล่อยอากาศ(Flush) ความถี่การระบายตะกอน(Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม (Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ (Flush*Flush) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ(Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะยกลน้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ(Height*Flush)

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอัตราการผลิตต่ำ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 1) (ช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 45 – 60 NTU) เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอน จากการทดลองแบบ CCD มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อ เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความขุ่นน้ำที่ได้ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน แสดงผลดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.6087	94.600	0.000
Dose	-1.3938	-31.941	0.000
Height	0.3938	9.024	0.000
Flush	-0.3979	-9.119	0.000
Drain	0.2021	4.631	0.000
Dose*Dose	0.1225	3.097	0.005
Flush*Flush	0.2788	7.046	0.000
Dose*Flush	0.2219	4.152	0.000
Height*Flush	-0.2594	-4.853	0.000

ตารางที่ 15 Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ค่าสังเกตที่	ค่าความขุ่นน้ำ (Ytur)	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)	Standardized Residual
10	6.800	6.396	0.404	2.17 R
21	7.850	7.520	0.330	2.33 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

จากตารางที่ 14 ถึง 15 เนื่องจากค่าสังเกต Unusual Observations ที่แสดงเป็นค่าที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยอย่างมาก จึงทำการตัดค่าสังเกตเหล่านี้ทิ้ง แล้วทำการวิเคราะห์การถดถอยใหม่ จนได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.5976	111.227	0.000
Dose	-1.3938	-40.442	0.000
Height	0.3523	9.249	0.000
Flush	-0.3389	-8.3666	0.000
Drain	0.2021	5.864	0.000
Dose*Dose	0.1488	4.653	0.000
Flush*Flush	0.2165	5.114	0.000
Dose*Flush	0.2219	5.257	0.000
Height*Flush	-0.2594	-6.145	0.000
S = 0.1688 R-Sq = 99.0% R-Sq(adj) = 98.6%			

จากตารางที่ 16 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน (Y_{tur}) ซึ่งมีค่า P – Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม (Dose) ระยะยกลำน้ำห้องสุญญากาศ (Height) เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) ความถี่การระบายตะกอน (Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม (Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ (Flush*Flush) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะยกลำน้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Height*Flush) และได้สมการถดถอยดังนี้

$$\hat{Y}_{tur} = 5.5976 - 1.3938 \text{ Dose} + 0.3523 \text{ Height} - 0.3389 \text{ Flush} + 0.2021 \text{ Drain} + 0.1488 \text{ Dose}^2 + 0.2165 \text{ Flush}^2 + 0.2219 \text{ Dose*Flush} - 0.2594 \text{ Height*Flush} \quad (17)$$

(1) การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ (Lack of Fit Test)

มีสมมติฐาน คือ H_0 : รูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสม

H_1 : รูปแบบการถดถอยที่ได้ไม่เหมาะสม

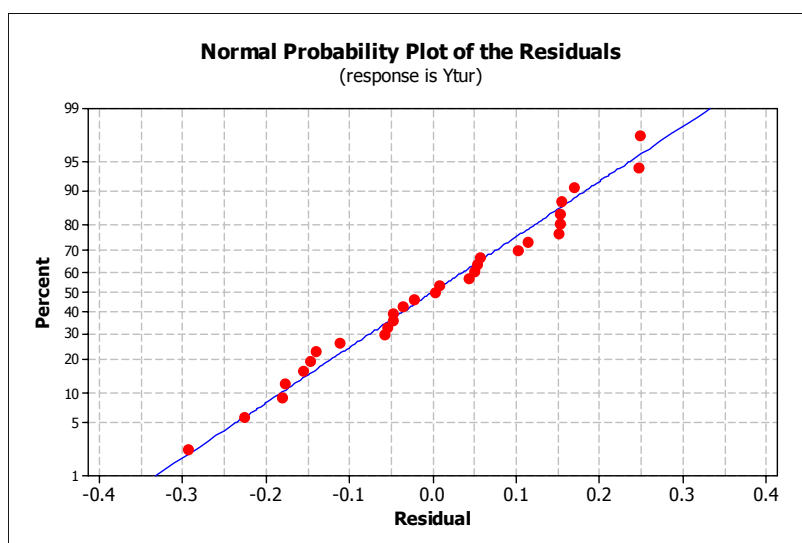
ตารางที่ 17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ
ถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลัง สอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Regression	55.1978	8	6.8997	242.06	0.000
Linear	51.9783	4	13.0253	456.96	0.000
Square	1.3555	2	0.6777	23.78	0.000
Interaction	1.8641	2	0.9320	32.70	0.000
Residual Error	0.5701	20	0.0285		
Lack - of - Fit	0.4965	14	0.0355	2.89	0.099
Pure Error	0.0736	6	0.0123		
Total	55.7679	28			

จากตารางที่ 17 จะเห็นได้ว่า ค่า P – Value ของ Lack of Fit = 0.099 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แสดงว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

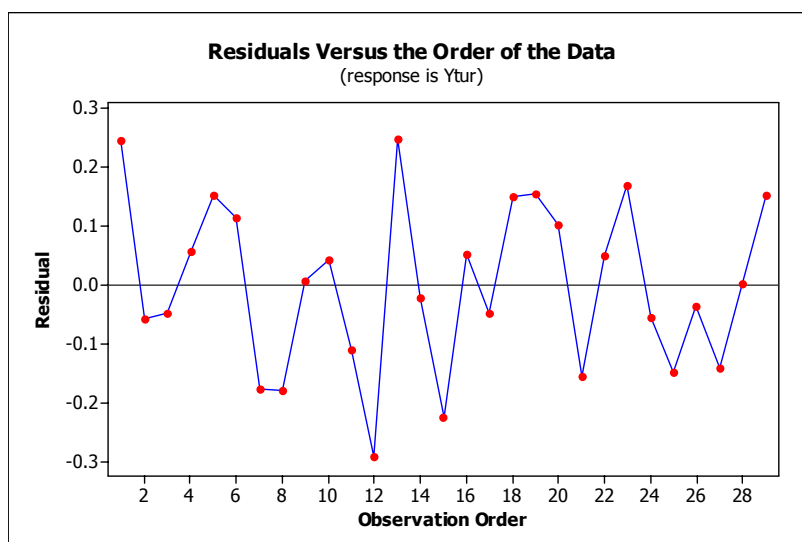
(2) ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการโดยอาศัยค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ในการวิเคราะห์ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่า เป็นแบบแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยใช้การพล็อตค่าคลาดเคลื่อนผ่านกระดาษความน่าจะเป็นสำหรับการแจกแจงปกติ โดยพิจารณาจากการกระจายของจุดค่าคลาดเคลื่อนที่พล็อตลงไป ดังภาพที่ 27 พบว่าข้อมูลมีการตกและกระจายตัวใกล้เคียงตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ



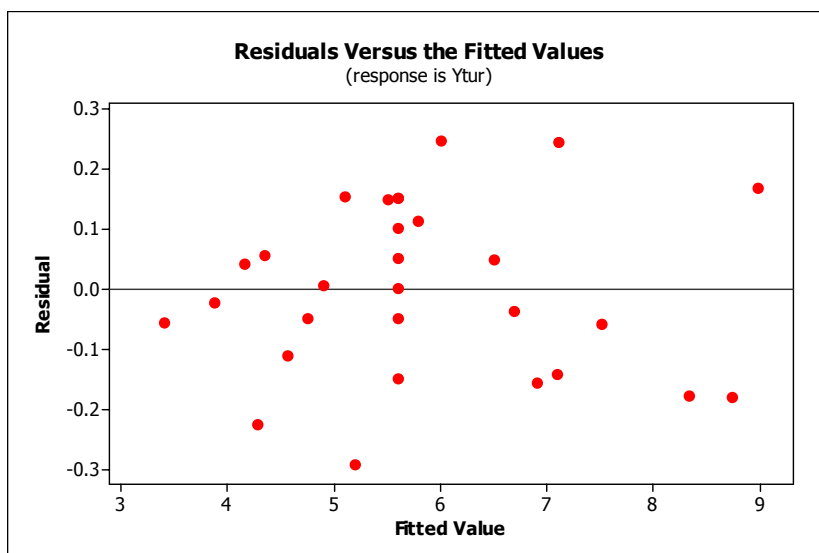
ภาพที่ 27 กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตราการผลิตต่ำ
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ(Independent) ของข้อมูล พิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของจุดค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับ ดังภาพที่ 28 พบว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบ แสดงว่า ค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 28 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตราการผลิตต่ำ
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

3. การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล (Fitted Value) ดังภาพที่ 29 พบว่า การกระจายตัวของจุด ไม่เป็นรูปแบบ คือ ไม่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นรูปโทรโข่ง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลที่ได้ มีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 29 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตรการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

3) หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแผนอัตรการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45-60 NTU

หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยใช้การวิเคราะห์กราฟ หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด กรณีค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว มีค่าเท่ากับเป้าหมายที่ต้องการ 6 NTU จากวิธี Response Optimization ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากรูปแบบสมการ

$$\hat{Y}_{tur} = 5.5976 - 1.3938 \text{ Dose} + 0.3523 \text{ Height} - 0.3389 \text{ Flush} + 0.2021 \text{ Drain} + 0.1488 \text{ Dose}^2 + 0.2165 \text{ Flush}^2 + 0.2219 \text{ Dose*Flush} - 0.2594 \text{ Height*Flush} \quad (18)$$

และกำหนดให้

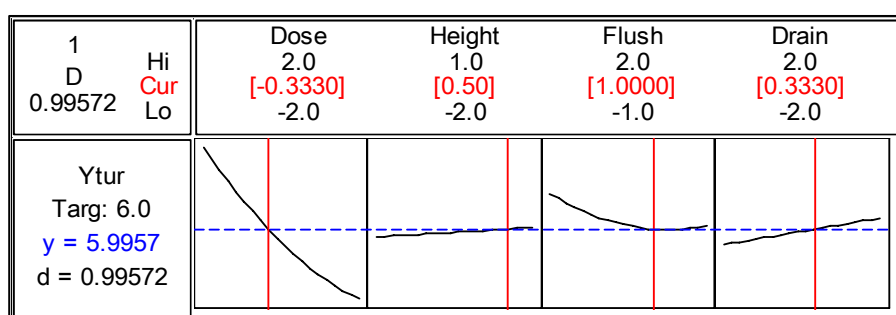
ปริมาณสารส้ม (Dose) มีค่าอยู่ระหว่าง 20 - 32 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะยกน้ำห้องสุญญากาศ (Height) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.25 - 0.55 เมตร

เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) มีค่าอยู่ระหว่าง 6 - 15 วินาที

ความถี่การระบายตะกอน (Drain) มีค่าอยู่ระหว่าง 120 - 600 วินาที

ผลจากการใช้วิธี Response Optimization แสดงในภาพที่ 30 ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในที่นี้คือ ค่าความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอน (Y_{tur}) มีค่าเท่ากับ 5.9957 NTU และได้ค่าของปัจจัยต่างๆ ดังนี้ คือ Dose = 25 มิลลิกรัมต่อลิตร , Height = 0.50 เมตร , Flush = 12 วินาที , Drain = 400 วินาที



ภาพที่ 30 กราฟ Response Optimization แผนอัตรการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

5.4.2 อัตราการผลิตสูง (5.0 ลบ.ม./วินาที) ซึ่งระดับของปัจจัยต่างๆ ที่ได้ทำการทดลองแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงระดับของปัจจัยที่อัตราการผลิตสูง สำหรับแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

ปัจจัย	ตัวแปร	ระดับปัจจัย				
		-2	-1	0	1	2
ปริมาณสารส้ม (B)	Dose	23	26	29	32	35
ระยะก่น้ำห้องสุญญากาศ (E)	Height	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55
เวลาการปล่อยอากาศ (G)	Flush	3	6	9	12	15
ความถี่ระบายตะกอน (H)	Drain	120	240	360	480	600

การออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลอง CCD สำหรับที่อัตราการผลิตสูง มีปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 4 ปัจจัย คือ Dose , Height , Flush , Drain ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลองทางสถิติ สำหรับแผนการทดลองแบบ CCD นี้ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง ผลการทดลองที่ได้ในช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 25 – 40 NTU และช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU แสดงดังตารางผนวกที่ ก4 และ ก5 ซึ่งจุดของการออกแบบประกอบไปด้วย

- Factorial Points จำนวน $2^k = 2^4 = 16$ ตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \text{- Center Points } (n_0) &= \left\{ 0.8386 \left(\sqrt{2^k + 2} \right)^2 - 2^k - 2k \right\} \\ &= \left\{ 0.8386 \left(\sqrt{2^4 + 2} \right)^2 - 2^4 - 2(4) \right\} = 6.1896 \approx 7 \end{aligned}$$

- Star Points จำนวน $2k = 2 \times 4 = 8$ ตัวอย่าง โดยแต่ละจุดของ Star Points อยู่ห่างจาก Center Points ด้วยระยะที่เท่ากัน คือ α โดย $\alpha = \sqrt[4]{2^4} = 2$

ก. ช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 25 – 40 NTU

1) การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนอง แผนอัตราการผลิตสูง แสดงผลการวิเคราะห์ ดังนี้

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนอง แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.57857	111.461	0.000
Dose	-1.32813	-49.136	0.000
Height	0.36563	13.527	0.000
Flush	-0.32604	-12.062	0.000
Drain	0.20104	7.438	0.000
Dose*Dose	0.09572	3.866	0.000
Height*Height	0.02385	0.963	0.340
Flush*Flush	0.29260	11.816	0.000

ตารางที่ 19 (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Drain*Drain	0.01760	0.711	0.481
Dose*Height	0.05781	1.746	0.087
Dose*Flush	0.17031	5.145	0.000
Dose*Drain	0.02969	0.897	0.374
Height*Flush	-0.24844	-7.505	0.000
Height*Drain	0.01719	0.519	0.606
Flush*Drain	-0.00156	-0.047	0.963

จากตารางที่ 19 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำภายหลังการตกตะกอน ซึ่งค่า P – Value น้อย กว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม (Dose) ระยะย่น้ำห้องสุญญากาศ (Height) เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) ความถี่การระบายตะกอน (Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม (Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ (Flush*Flush) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะย่น้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Height*Flush)

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอัตราการผลิตสูง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 1 (ช่วงความขุ่นน้ำดิบ ระหว่าง 25 – 40 NTU) เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอน จากการทดลองแบบ CCD มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อ เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความขุ่นน้ำที่ได้ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน แสดงผลดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตราการผลิตสูง
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25-40 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.61683	153.771	0.000
Dose	-1.32813	-49.403	0.000
Height	0.36563	13.600	0.000
Flush	-0.32604	-12.128	0.000
Drain	0.20104	7.478	0.000
Dose*Dose	0.09174	3.764	0.000
Flush*Flush	0.28861	11.840	0.000
Dose*Flush	0.17031	5.173	0.000
Height*Flush	-0.24844	-7.545	0.000

ตารางที่ 21 Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิต
สูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ค่าสังเกตที่	ค่าความขุ่นน้ำ (Y _{tur})	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)	Standardized Residual
30	8.150	8.637	-0.487	-2.86 R
23	7.750	7.423	0.327	2.07 R
17	6.550	6.019	0.531	3.04 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

จากตารางที่ 20 ถึง 21 เนื่องจากค่าสังเกต Unusual Observations ที่แสดงเป็นค่าที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยอย่างมาก จึงทำการตัดค่าสังเกตเหล่านี้ออก แล้วทำการวิเคราะห์การถดถอยใหม่ จนได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.6049	231.078	0.000
Dose	-1.3505	-79.664	0.000
Height	0.4099	23.196	0.000
Flush	-0.3346	-18.361	0.000
Drain	0.1417	6.817	0.000
Dose*Dose	0.1098	7.363	0.000
Flush*Flush	0.2859	17.085	0.000
Dose*Flush	0.2039	9.511	0.000
Height*Flush	-0.2983	-14.075	0.000
S = 0.1094 R-Sq = 99.4% R-Sq(adj) = 99.3%			

จากตารางที่ 22 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน (Y_{tur}) ซึ่งมีค่า P – Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม (Dose) ระยะขยน้ำห้องสุญญากาศ (Height) เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) ความถี่การระบายตะกอน (Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม (Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ (Flush*Flush) พจน์กำลังสองของความถี่การระบายตะกอน (Drain*Drain) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะขยน้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Height*Flush) และได้สมการถดถอยดังนี้

$$\hat{Y}_{tur} = 5.6049 - 1.3505 \text{ Dose} + 0.4099 \text{ Height} - 0.3346 \text{ Flush} + 0.1417 \text{ Drain} + 0.1098 \text{ Dose}^2 + 0.2859 \text{ Flush}^2 + 0.2039 \text{ Dose*Flush} - 0.2983 \text{ Height*Flush} \quad (19)$$

(1) การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ (Lack of Fit Test)

มีสมมติฐาน คือ H_0 : รูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสม

H_1 : รูปแบบการถดถอยที่ได้ไม่เหมาะสม

ตารางที่ 23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ
ถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

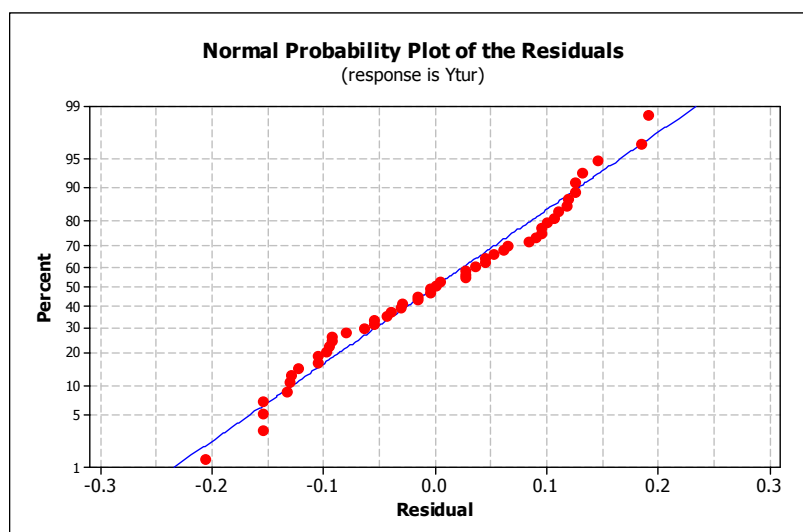
แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลัง สอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Regression	81.9552	8	10.2444	855.99	0.000
Linear	75.4678	4	19.9858	1669.966	0.000
Square	3.3567	2	1.9174	160.21	0.000
Interaction	3.1307	2	1.5653	130.80	0.000
Residual Error	0.5146	43	0.0120		
Lack - of - Fit	0.2360	13	0.0182	1.96	0.064
Pure Error	0.2786	30	0.0093		
Total	82.4698	51			

จากตารางที่ 23 จะเห็นได้ว่า ค่า P – Value ของ Lack of Fit = 0.064 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แสดงว่า รูปแบบการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมแล้ว

(2) ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

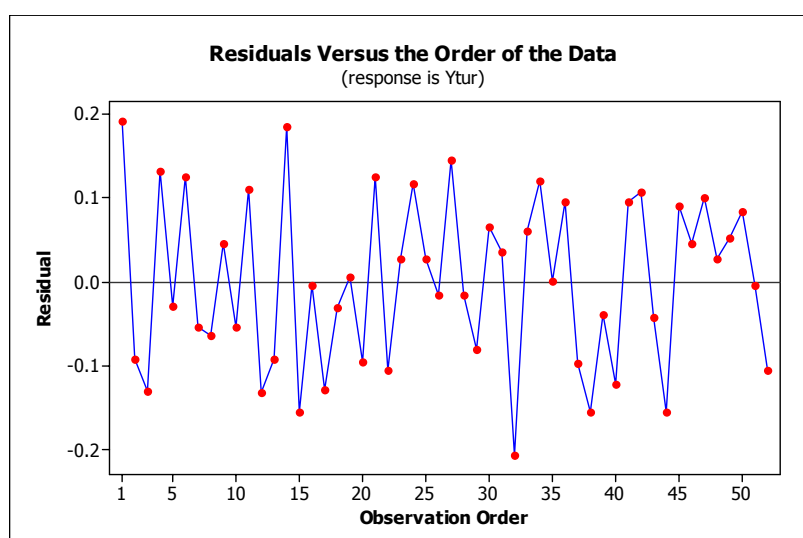
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาด เป็นไปตามหลักการโดยอาศัยค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ในการวิเคราะห์ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่า เป็นแบบแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยใช้การพล็อตค่าคลาดเคลื่อนผ่านกระดาษความน่าจะเป็นสำหรับการแจกแจงปกติ โดยพิจารณาจากการกระจายของจุดค่าคลาดเคลื่อนที่พล็อตลงไป ดังภาพที่ 31 พบว่า ข้อมูลมีการตกและกระจายตัวใกล้เคียงตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ



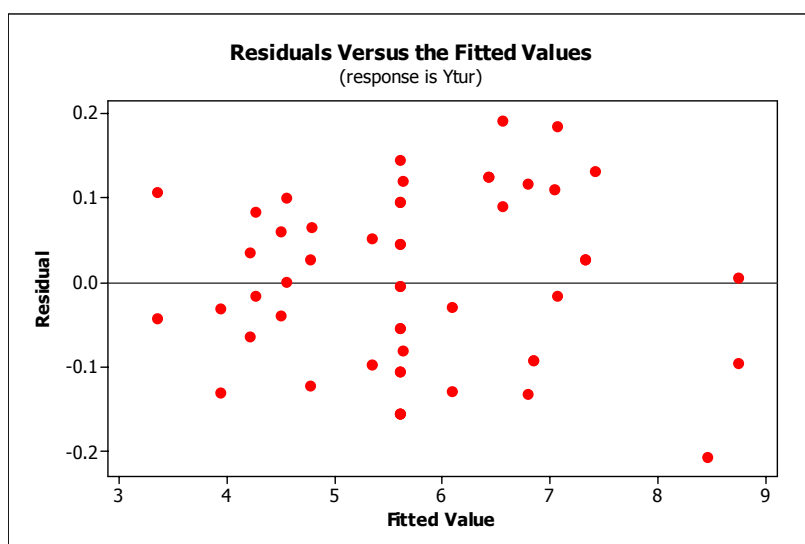
ภาพที่ 31 กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตราการผลิตสูง
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของข้อมูล พิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของจุดค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับ ดังภาพที่ 32 พบว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบ แสดงว่า ค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 32 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตราการผลิตสูง
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

3. การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล (Fitted Value) ดังภาพที่ 33 พบว่า การกระจายตัวของจุด ไม่เป็นรูปแบบ คือ ไม่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นรูปโทรโข่ง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลที่ได้ มีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 33 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

3) หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25-40 NTU

หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยใช้การวิเคราะห์กราฟ หาภาวะที่เหมาะสมที่สุด กรณีค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว มีค่าเท่ากับเป้าหมายที่ต้องการ 6 NTU จากวิธี Response Optimization ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากรูปแบบสมการ

$$\hat{Y}_{tur} = 5.6049 - 1.3505 \text{ Dose} + 0.4099 \text{ Height} - 0.3346 \text{ Flush} + 0.1417 \text{ Drain} + 0.1098 \text{ Dose}^2 + 0.2859 \text{ Flush}^2 + 0.2039 \text{ Dose} * \text{Flush} - 0.2983 \text{ Height} * \text{Flush} \quad (20)$$

และกำหนดให้

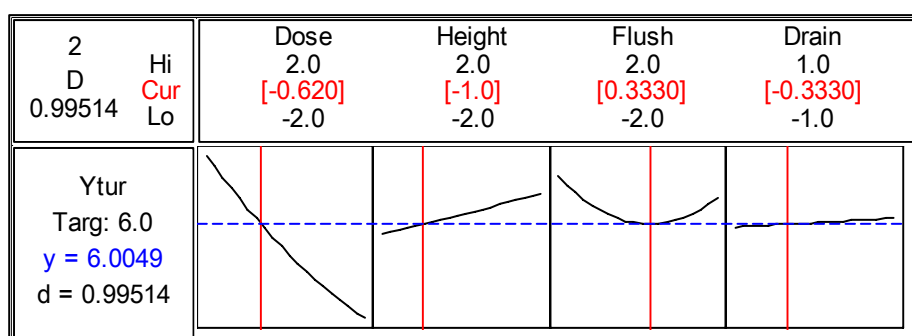
ปริมาณสารส้ม (Dose) มีค่าอยู่ระหว่าง 23 - 35 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะยกน้ำห้องสุญญากาศ (Height) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.55 เมตร

เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) มีค่าอยู่ระหว่าง 3 - 15 วินาที

ความถี่การระบายตะกอน (Drain) มีค่าอยู่ระหว่าง 240 - 480 วินาที

ผลจากการใช้วิธี Response Optimization แสดงในภาพที่ 34 ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในที่นี้ คือ ค่าความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอน (Y_{tur}) มีค่าเท่ากับ 6.0049 NTU และได้ค่าของปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ Dose = 27 มิลลิกรัมต่อลิตร , Height = 0.25 เมตร , Flush = 10 วินาที , Drain = 320 วินาที



ภาพที่ 34 กราฟ Response Optimization แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU

ข. ช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 45 – 60 NTU

1) การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตรการผลิตสูง
แสดงผลการวิเคราะห์ ดังนี้

ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.60714	39.158	0.000
Dose	-1.39375	-18.023	0.000
Height	0.42708	5.523	0.000

ตารางที่ 24 (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Flush	-0.45625	-5.900	0.000
Drain	0.27292	3.529	0.003
Dose*Dose	0.18207	2.570	0.021
Height*Height	0.04457	0.629	0.538
Flush*Flush	0.34457	4.864	0.000
Drain*Drain	0.11332	1.599	0.129
Dose*Height	0.10313	1.089	0.292
Dose*Flush	0.25312	2.673	0.017
Dose*Drain	-0.03438	-0.363	0.721
Height*Flush	-0.30312	-3.200	0.006
Height*Drain	0.02188	0.231	0.820
Flush*Drain	-0.01563	-0.165	0.871

จากตารางที่ 24 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำภายหลังผ่านการตกตะกอน ซึ่งค่า P – Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม (Dose) ระยะยักน้ำห้องสุญญากาศ (Height) เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) ความถี่การระบายตะกอน (Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม (Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ (Flush*Flush) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะยักน้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Height*Flush)

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอัตราการผลิตสูง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 1) (ช่วงความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 45 – 60 NTU) เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอน จากการทดลองแบบ CCD มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อ เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความขุ่นน้ำที่ได้ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอนที่ได้ ผลดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ แผนอัตรการผลิตสูง
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.7529	57.181	0.000
Dose	-1.3937	-18.823	0.000
Height	0.4271	5.768	0.000
Flush	-0.4562	-6.162	0.000
Drain	0.2729	3.686	0.001
Dose*Dose	0.1669	2.486	0.021
Flush*Flush	0.3294	4.906	0.000
Dose*Flush	0.2531	2.791	0.011
Height*Flush	-0.3031	-3.343	0.003

ตารางที่ 26 Unusual Observations ในการวิเคราะห์การถดถอยของการทดลอง CCD แผนการผลิต
สูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ค่าสังเกตที่	ค่าความขุ่นน้ำ (Y _{tur})	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)	Standardized Residual
14	7.450	6.299	1.151	3.65 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

จากตารางที่ 25 ถึง 26 เนื่องจากค่าสังเกต Unusual Observations ที่แสดงเป็นค่าที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยอย่างมาก จึงทำการตัดค่าสังเกตเหล่านี้ออก แล้วทำการวิเคราะห์การถดถอยใหม่ จนได้สมการถดถอยที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 27

ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยขั้นสุดท้าย เมื่อตัดค่าสังเกตที่มีอิทธิพลต่อเส้นถดถอยออกจนหมด แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า P-Value
Constant	5.6358	82.995	0.000
Dose	-1.3938	-29.272	0.000
Height	0.4271	8.970	0.000
Flush	-0.4562	-9.582	0.000
Drain	0.1461	2.777	0.011
Dose*Dose	0.2108	4.806	0.000
Flush*Flush	0.3733	8.511	0.000
Dose*Flush	0.2531	4.341	0.000
Height*Flush	-0.3031	-5.198	0.000
S = 0.2333 R-Sq = 98.2% R-Sq(adj) = 97.6%			

จากตารางที่ 27 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน (Y_{tur}) ซึ่งมีค่า P – Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณสารส้ม (Dose) ระยะขกน้ำห้องสุญญากาศ(Height) เวลาในการปล่อยอากาศ(Flush) ความถี่การระบายตะกอน (Drain) พจน์กำลังสองของปริมาณสารส้ม (Dose*Dose) พจน์กำลังสองของเวลาในการปล่อยอากาศ (Flush*Flush) พจน์ร่วมระหว่างปริมาณสารส้มกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Dose*Flush) พจน์ร่วมระหว่างระยะขกน้ำห้องสุญญากาศกับเวลาในการปล่อยอากาศ (Height*Flush) และได้สมการถดถอยดังนี้

$$\hat{Y}_{tur} = 5.6358 - 1.3938 \text{ Dose} + 0.4271 \text{ Height} - 0.4562 \text{ Flush} + 0.1461 \text{ Drain} + 0.2108 \text{ Dose}^2 + 0.3733 \text{ Flush}^2 + 0.2531 \text{ Dose*Flush} - 0.3031 \text{ Height*Flush} \quad (21)$$

(1) การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ (Lack of Fit Test)

มีสมมติฐาน คือ H_0 : รูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสม

H_1 : รูปแบบการถดถอยที่ได้ไม่เหมาะสม

ตารางที่ 28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ
ถดถอยสำหรับ แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

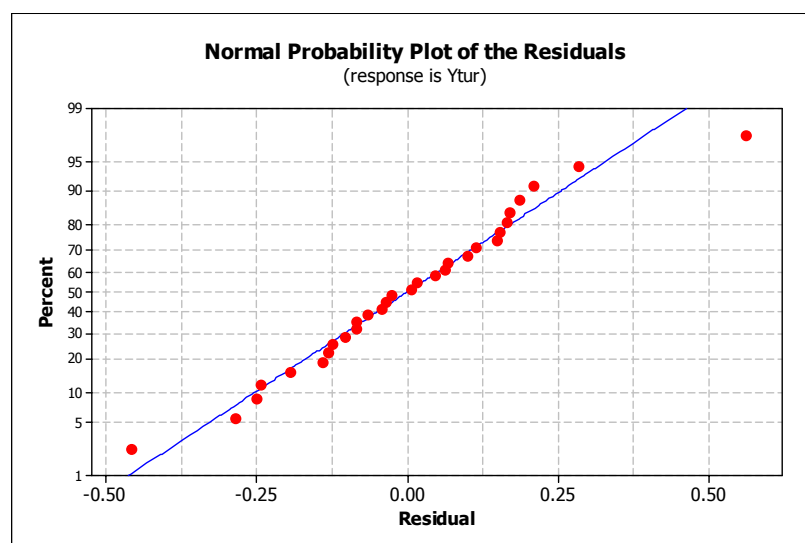
แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลัง สอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Regression	63.9760	8	7.9970	146.97	0.000
Linear	56.7354	4	14.1035	259.20	0.000
Square	4.7453	2	2.3727	43.61	0.000
Interaction	2.4953	2	1.2477	22.93	0.000
Residual Error	1.1426	21	0.0544		
Lack - of - Fit	1.0105	15	0.0674	3.06	0.088
Pure Error	0.1321	6	0.0220		
Total	65.1187	29			

จากตารางที่ 28 จะเห็นได้ว่า ค่า P – Value ของ Lack of Fit = 0.088
ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แสดงว่ารูปแบบการถดถอย
ที่ได้ มีความเหมาะสม

(2) ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

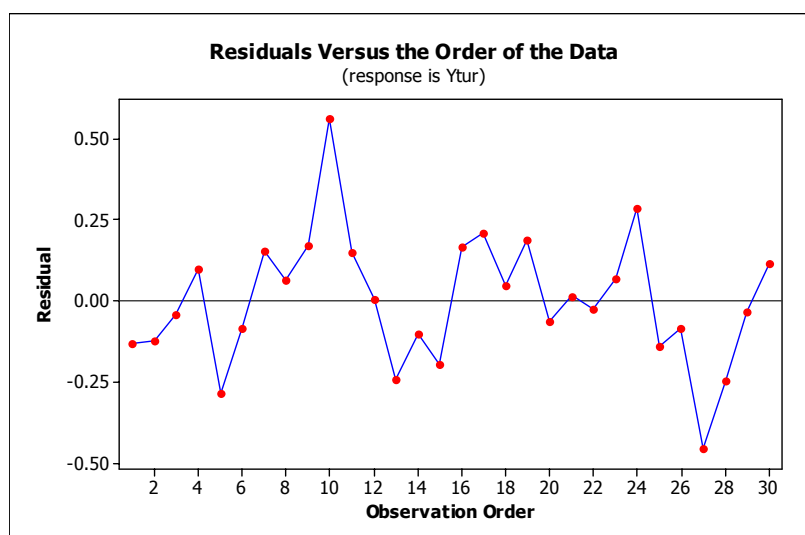
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการโดยอาศัยค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ในการวิเคราะห์ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่า เป็นแบบแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยใช้การพล็อตค่าคลาดเคลื่อนผ่านกระดาษความน่าจะเป็นสำหรับการแจกแจงปกติ โดยพิจารณาจากการกระจายของจุดค่าคลาดเคลื่อนที่พล็อตลงไป ดังภาพที่ 35 พบว่าข้อมูลมีการตกและกระจายตัวใกล้เคียงตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ



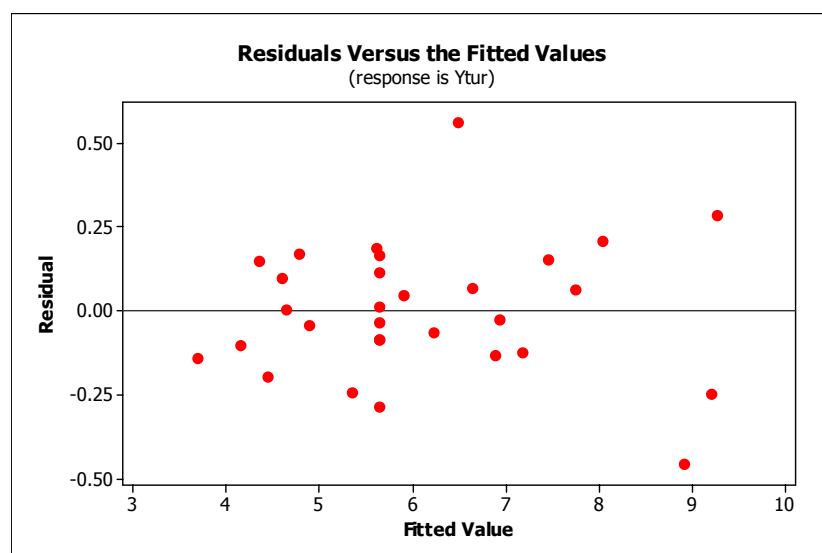
ภาพที่ 35 กราฟ Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน แผนอัตราการผลิตสูง
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของข้อมูล พิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของจุดค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับ ดังภาพที่ 36 พบว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบ แสดงว่า ค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 36 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล แผนอัตราการผลิตสูง
ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

3. การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายพล็อตค่าคลาดเคลื่อน กับ ค่าประมาณข้อมูล (Fitted Value) ดังภาพที่ 37 พบว่า การกระจายตัวของจุดไม่เป็นรูปแบบ คือ ไม่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นรูปโทรโข่ง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลที่ได้ มีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 37 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณข้อมูล แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

3) หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45-60 NTU

หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยใช้การวิเคราะห์กราฟ หาสถานะที่เหมาะสมที่สุด กรณีค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว มีค่าเท่ากับเป้าหมายที่ต้องการ 6 NTU จากวิธี Response Optimization ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากรูปแบบสมการ

$$\hat{Y}_{tur} = 5.6358 - 1.3938 \text{ Dose} + 0.4271 \text{ Height} - 0.4562 \text{ Flush} + 0.1461 \text{ Drain} + 0.2108 \text{ Dose}^2 + 0.3733 \text{ Flush}^2 + 0.2531 \text{ Dose*Flush} - 0.3031 \text{ Height*Flush} \quad (22)$$

และกำหนดให้

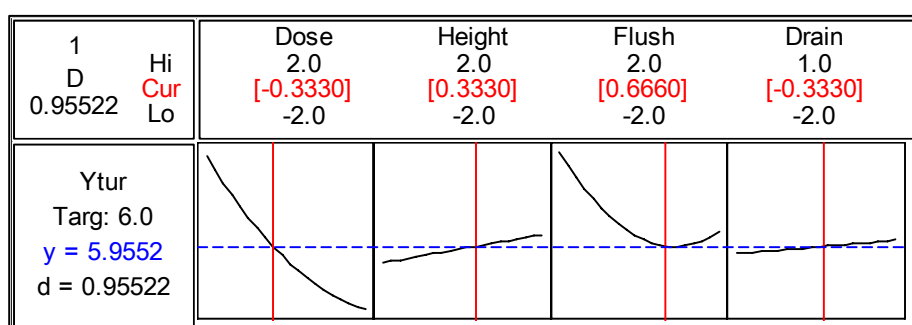
ปริมาณสารส้ม (Dose) มีค่าอยู่ระหว่าง 23 - 35 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะยกน้ำห้องสุญญากาศ (Height) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.55 เมตร

เวลาในการปล่อยอากาศ (Flush) มีค่าอยู่ระหว่าง 3 - 15 วินาที

ความถี่การระบายตะกอน (Drain) มีค่าอยู่ระหว่าง 120 - 480 วินาที

ผลจากการใช้วิธี Response Optimization แสดงในภาพที่ 38 ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในที่นี้ คือ ค่าความขุ่นน้ำหลังการตกตะกอน (Ytur) มีค่าเท่ากับ 5.9552 NTU และได้ค่าของปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ Dose = 28 มิลลิกรัมต่อลิตร , Height = 0.38 เมตร , Flush = 11 วินาที , Drain = 320 วินาที

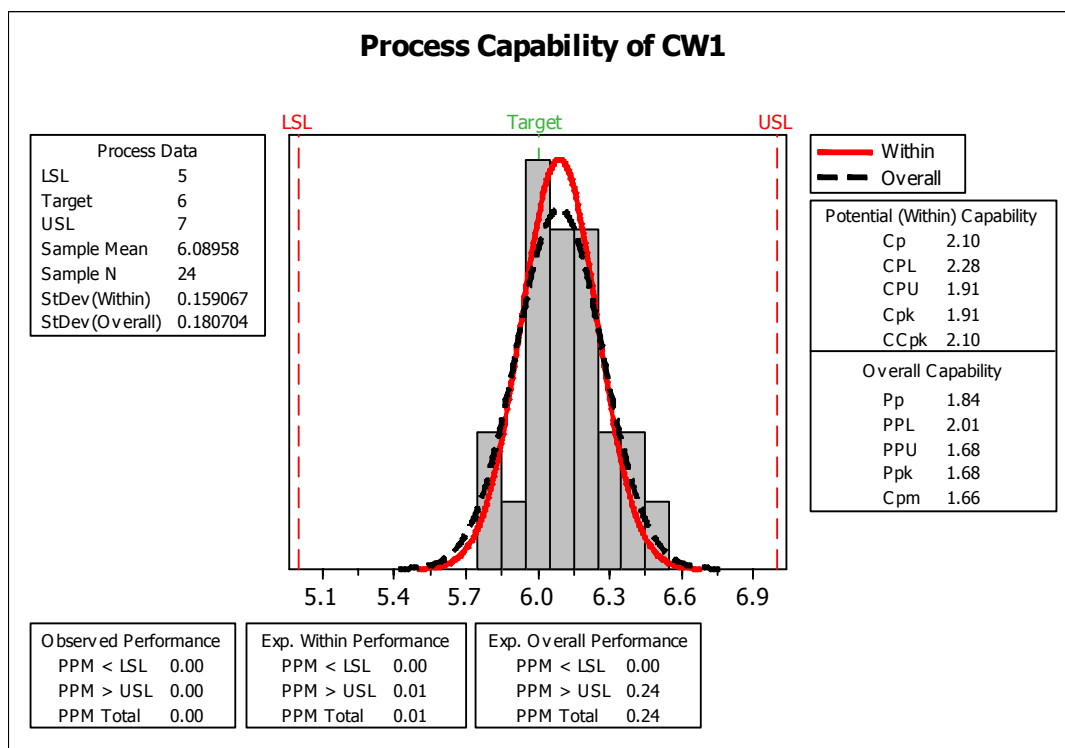


ภาพที่ 38 กราฟ Response Optimization แผนอัตรการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU

6. ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ จากขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลของทั้งสองแผนการทดลองสำหรับอัตรการผลิตต่ำ(3.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) กับอัตรการผลิตสูง(5.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) เป็นระดับการผลิตน้ำประปาที่กำหนดให้นำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง ที่มีการปรับอัตรการผลิตน้ำให้เหมาะสมกับปริมาณการใช้ในแต่ละช่วงเวลา ของระบบการผลิตเฟสที่ 2 ตามช่วงความขุ่นน้ำดิบ โดยทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล จำนวน 2 ชุด ใช้เวลาทดลอง 2 วันต่อชุดการทดลอง และเก็บตัวอย่างน้ำภายหลังการตกตะกอนจากจุดเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อวัดค่าความขุ่นทุกๆ 2 ชั่วโมง ดังแสดงตามตารางผนวกที่ ง1 และ ง2 ตามลำดับ นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการและคำนวณค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการต่างๆ แสดงดังภาพที่ 39 และ 40 ดังนี้คือ

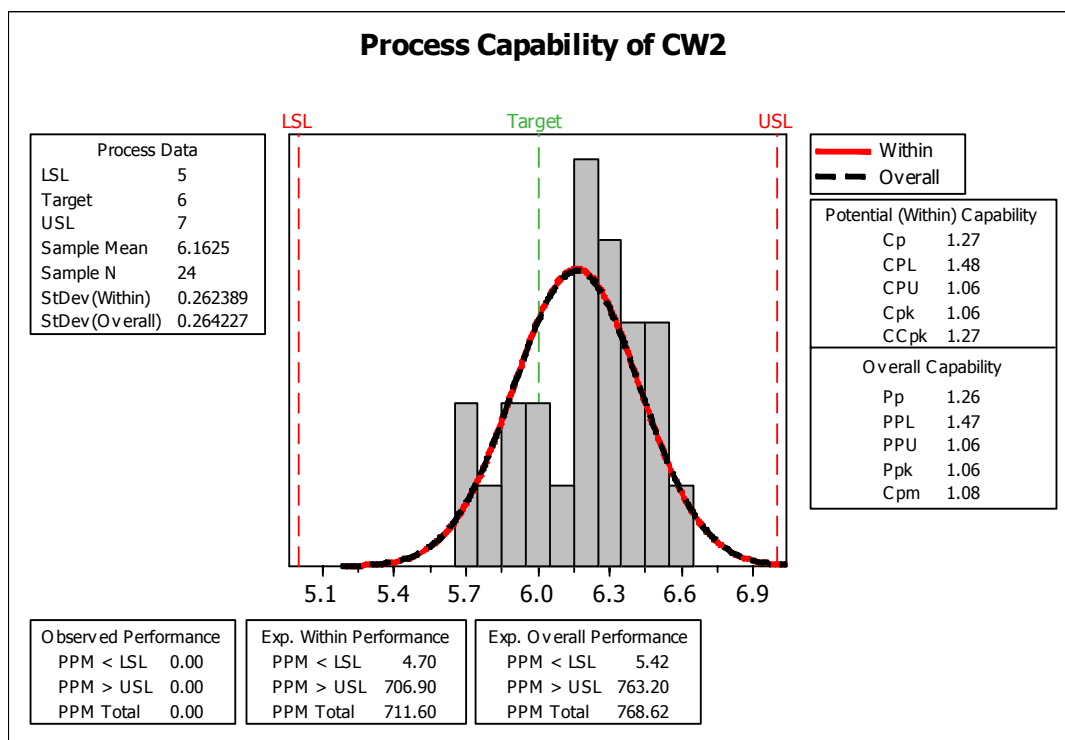
6.1 แผนการทดลองยืนยันผล ครั้งที่ 1 ความขุ่นน้ำดิบอยู่ในช่วง 27 – 40 NTU



ภาพที่ 39 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการในการยืนยันผล ครั้งที่ 1

จากภาพที่ 39 ผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูล การยืนยันผล ครั้งที่ 1 ซึ่งมีข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) คือค่าความขุ่นคงเหลือ = 5 NTU และ ข้อกำหนดด้านบน (USL) คือค่าความขุ่นคงเหลือ = 7 NTU นั้น โดยมีเป้าหมาย (Target) ให้ค่าความขุ่นคงเหลือเป็น 6 NTU พบว่า ไม่มีค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วหรือค่าความขุ่นคงเหลือ(CW) เกิน พิกัดกำหนดจากกระบวนการผลิตเลย เมื่อพิจารณา ค่า $C_p = 2.10$ มากกว่า 1.33 แสดงว่า กระบวนการดีมาก พิจารณาค่า $C_{pk} = 1.91$ มากกว่า 1 มาก แสดงว่า ค่าเฉลี่ยของค่าความขุ่น คงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนมีประสิทธิภาพมาก พิจารณาค่า $C_{pm} = 1.66$ มากกว่า 1.33 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าความขุ่นคงเหลือจากกระบวนการมีค่าใกล้เคียงค่าความขุ่นเป้าหมายที่ ต้องการมาก เมื่อดูจากข้อมูลค่าความขุ่นน้ำดิบ พบว่ามีค่ากระจายตัวอยู่ในช่วงความขุ่น 27 – 40 NTU ทำให้สามารถใช้แผนการผลิตในช่วงความขุ่น 25 - 40 NTU ที่ทราบค่าที่เหมาะสมทั้งหมดได้ เป็นอย่างดี

6.2 แผนการทดลองยืนยันผล ครั้งที่ 2 ความขุ่นน้ำดิบอยู่ในช่วง 36 – 49 NTU



ภาพที่ 40 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการในการยืนยันผล ครั้งที่ 2

จากภาพที่ 40 พบว่าผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูลการยืนยันผลครั้งที่ 2 ซึ่งมีข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) คือค่าความขุ่นคงเหลือ = 5 NTU และ ข้อกำหนดด้านบน (USL) คือค่าความขุ่นคงเหลือ = 7 NTU นั้น โดยมีเป้าหมาย (Target) ให้ค่าความขุ่นคงเหลือเป็น 6 NTU พบว่า ไม่มีค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วหรือค่าความขุ่นคงเหลือ (CW) เกินพิกัดกำหนดจากกระบวนการผลิตเลย เมื่อพิจารณา ค่า $C_p = 1.27$ มากกว่า 1 แต่น้อยกว่า 1.33 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี พิจารณาค่า $C_{pk} = 1.06$ มากกว่า 1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าความขุ่นคงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนมีประสิทธิภาพพอใช้ พิจารณาค่า $C_{pm} = 1.08$ มากกว่า 1 แต่น้อยกว่า 1.33 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าความขุ่นคงเหลือจากกระบวนการมีค่าใกล้เคียงค่าความขุ่นเป้าหมายที่ต้องการพอสมควร เมื่อดูจากข้อมูลค่าความขุ่นน้ำดิบ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงความขุ่น 36 – 49 NTU ทำให้ต้องใช้แผนการผลิตในช่วงความขุ่น 25 - 40 NTU และ 45 - 60 NTU ที่ทราบค่าที่เหมาะสมทั้งหมดรวมกันได้เป็นอย่างดี แต่ความขุ่นน้ำคงเหลือวัดค่าได้สูงขึ้นและมีการกระจายมากขึ้นจึงทำให้สมรรถภาพของกระบวนการลดลง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษา เพื่อหาวิธีการปรับปรุงการกำจัดความขุ่นน้ำดิบด้วยการตกตะกอนทางเคมี ในถังตกตะกอนแบบใช้ชั้นสัจจ์ ของกระบวนการผลิตน้ำประปา ในโรงงานกรณีศึกษานี้ นั้น จากการสำรวจสภาพปัญหาเพื่อทำความเข้าใจและกำหนดเป้าหมายที่ต้องการแก้ไขปรับปรุง ซึ่งพบว่าถังตกตะกอนแบบใช้ชั้นสัจจ์ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สภาวะที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตในระดับที่แตกต่างกันมากและบ่อยครั้ง จากการที่ไม่ทราบค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ทำให้ต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการช่วยให้คุณภาพน้ำเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด งานวิจัยจึงได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาเป็นสองส่วน

ในการศึกษาส่วนแรก ที่ต้องการทราบปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสม โดยหาความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบเฉพาะที่มีผลทางทฤษฎีต่อการตกตะกอนด้วยสารเคมี ได้แก่ ความขุ่นน้ำ(Tur) พีเอช(pH) สภาพความเป็นด่าง(Alk) ความกระด้าง(Har) มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญจากวิธี Stepwise นำตัวแปรเข้าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และนำตัวแปรออกที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 ในรูปสมการด้วยโมเดล 3 แบบ ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบโมเดลที่ 1 ปรากฏว่า ใช้พารามิเตอร์คุณภาพน้ำเพียง 2 ตัวแปร คือ ความขุ่นน้ำ(Tur) กับสภาพความเป็นด่าง(Alk) ด้วยรูปแบบดังสมการที่ (23) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่าแล้ว $R^2_{adj} = 0.719$ ซึ่งมีค่าความคลื่อนที่สูง แต่เมื่อทำการปรับผลการคาดการณ์ที่ได้ด้วยค่าความแตกต่างเป็นค่าคงที่เท่ากับ -1.8 แล้ว สามารถคาดการณ์ได้แม่นยำขึ้นอย่างมาก การนำไปใช้งานจึงทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ดีกว่าการทำการทดลองจาร์เทสต์ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านความแปรปรวนที่ไม่คงที่อยู่พอสมควร

$$\text{Log}_{10}(\text{AlumDose}) = 0.958 + 0.004 \text{ Tur} + 0.001 \text{ Alk} \quad (23)$$

จากการวิเคราะห์รูปแบบโมเดลทั้งหมดทำให้ทราบว่าค่าพารามิเตอร์ความขุ่นน้ำดิบ มีผลต่อปริมาณการใช้สารส้มมากที่สุด จึงสามารถสรุปข้อมูลปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในแต่ละช่วงความขุ่นน้ำดิบได้ ดังตารางที่ 29 เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการปรับปริมาณการจ่ายสารส้มให้เหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบในช่วงเวลาต่างๆได้

ตารางที่ 29 ค่าประมาณปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในแต่ละช่วงความขุ่น

ช่วงความขุ่นน้ำดิบ (NTU)	ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมโดยประมาณ (mg / l)
10 - 24	16
25 - 39	17
40 - 54	19
55 - 69	22
70 - 84	27
85 - 100	30

การศึกษาในส่วนที่สอง ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น จากการทดลองขั้นต้นด้วยวิธีทางจุลินทรีย์ เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองค่าความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอน จากปัจจัยควบคุมได้ทีละตัวว่ามีผล 8 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณสารส้ม อัตราการผลิต การระบายตะกอน ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ เวลาในการปล่อยอากาศ จุดจ่ายสารส้ม การเติมคลอรีนขั้นต้น เวลาดูดอากาศ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าปัจจัย ปริมาณสารส้ม (B) อัตราการผลิต (A) การระบายตะกอน (H) มีผลต่อค่าความขุ่นหลังผ่านการตกตะกอนอย่างมาก ส่วนปัจจัยอื่นที่ส่งผลน้อยลำดับถัดมา คือ ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ (E) และเวลาในการปล่อยอากาศ (G) ที่คาดว่าจะมีผลต่อการตกตะกอนเพิ่มขึ้นได้อีก เมื่อมีการปรับระดับของปัจจัยที่ส่งผลมากในลำดับต่างๆ ให้มีช่วงระดับปัจจัยแคบลงและมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น จึงนำปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้ไปทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองจากการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิต

เมื่อทำการทดลองเช่นทรีลคอมโพสิต สามารถหาสภาวะที่เหมาะสม และนำไปใช้กำหนดในกระบวนการผลิตจริง ดังนี้ ในช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU ที่อัตราการผลิตต่ำ พบว่าค่าที่เหมาะสม คือ ปริมาณสารส้ม 24 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ 0.40 เมตร เวลาในการปล่อยอากาศ 11 วินาที ความถี่การระบายตะกอน 400 วินาที และที่อัตราการผลิตสูง พบว่าค่าที่เหมาะสม คือ ปริมาณสารส้ม 27 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ 0.25 เมตร เวลาในการปล่อยอากาศ 10 วินาที ความถี่การระบายตะกอน 320 วินาที สำหรับในช่วงความขุ่นน้ำดิบ 45 – 60 NTU พบว่าค่าที่เหมาะสม คือ ปริมาณสารส้ม 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ 0.50 เมตร เวลาในการปล่อยอากาศ 12 วินาที ความถี่การระบายตะกอน 400 วินาที ที่อัตราการผลิตต่ำ และปริมาณสารส้ม 28 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะขกน้ำในห้องสุญญากาศ 0.38

เมตร เวลาในการปล่อยอากาศ 11 วินาที ความถี่การระบายตะกอน 320 วินาที ที่อัตราการผลิตสูง ร่วมกับปัจจัยกำหนดอื่นที่ทราบอยู่แล้ว เพื่อให้ค่าความขุ่นน้ำหลังผ่านการตกตะกอนแล้วมีค่าเป็น 6 NTU ซึ่งเป็นค่าตรงกลางของเกณฑ์การควบคุมในช่วง 5 – 7 NTU ของโรงงานที่ทำการศึกษได้ โดยใช้สารส้มลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทำการทดลองยืนยันผล โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล หาสถานะที่เหมาะสมมาทำการทดลองกับระบบการผลิตจริง สำหรับอัตราการผลิตต่ำและอัตราการผลิตสูง ที่ต้องมีการปรับเพิ่มลดระหว่างวัน พบว่า ผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูลการยืนยันผล ซึ่งมีข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) คือค่าความขุ่นคงเหลือ = 5 NTU และข้อกำหนดด้านบน (USL) คือค่าความขุ่นคงเหลือ = 7 NTU โดยมีเป้าหมายให้ค่าความขุ่นคงเหลือเป็น 6 NTU นั้น ไม่มีค่าความขุ่นคงเหลือเกินพิกัดจากกระบวนการผลิตเลย เมื่อพิจารณาค่า C_p C_{pk} C_{pm} มีค่ามากกว่า 1 ทั้งหมด แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดีพอใช้และค่าเฉลี่ยของค่าความขุ่นคงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนมีประสิทธิภาพ จากการทดลองยืนยันผลครั้งที่ 2 แสดงสมรรถภาพกระบวนการลดลง เมื่อใช้ค่าที่เหมาะสมของแผนการผลิตในช่วงความขุ่นน้ำดิบ 25 – 40 NTU และ 45 – 60 NTU ร่วมกัน เมื่อคำนวณปริมาณการใช้สารส้มพบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.923 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งลดลงจากค่าปริมาณการใช้สารส้มเฉลี่ยของช่วงเวลาก่อนหน้าที่มีค่าเท่ากับ 16.392 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ปริมาณการสูบน้ำดิบทั้งวันเฉลี่ย 347,425 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เท่ากัน ทำให้สามารถคิดประมาณการว่าลดค่าใช้จ่ายลงได้เป็นจำนวนเงิน 6,015 บาทต่อวัน ในการผลิตเพียงเฟสเดียว หรือกว่า 180,450 บาทต่อเดือนต่อเฟส

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาเฉพาะขั้นตอนในการกำจัดความขุ่นด้วยสารเคมี ของถังตกตะกอนเท่านั้น ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำประปาทั้งหมด ยังมีอีกหลายกระบวนการที่ประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพ ประสิทธิภาพ และขาดข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐาน เช่น กระบวนการสูบน้ำดิบ การสูบส่งน้ำประปา การสูบจ่ายน้ำประปา ให้มีความเหมาะสมกับสอดคล้องกับกระบวนการตกตะกอน เป็นต้น ดังนั้นการปรับปรุง สามารถทำได้โดย นำวิธีการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับปัญหาลักษณะเช่นนี้ได้
2. เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาปรับปรุงเฉพาะถังตกตะกอนแบบมีชั้นสลัดจ์ที่ประสบปัญหา กระบวนการไม่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นสามารถนำไปใช้กับกระบวนการตกตะกอนกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนตะกอนได้
3. จากการนำระดับปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้ในระบบผลิตจริง พบว่า ในช่วงความขุ่นน้ำดิบที่คาบเกี่ยวกันระหว่างแผนการผลิตในแต่ละช่วงความขุ่นที่ทราบค่าที่เหมาะสม จากผลวิเคราะห์ตำแหน่งค่าเฉลี่ยของกระบวนการ Cpk Cpm แสดงว่าตำแหน่งยังไม่เหมาะสม เนื่องจากมีค่าความขุ่นสูงกว่าเป้าหมายพอสมควรและความเบี่ยงเบนยังคงสูงอยู่ จึงควรมีการปรับปรุงต่อไป
4. ควรเพิ่มความสามารถในการคาดการณ์ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของโมเดลที่ได้ โดยอาจเพิ่มตัวแปรที่มีความสำคัญ เช่น อุณหภูมิของน้ำดิบ เป็นต้น เพื่อให้ผลที่ได้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นและหาค่าที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนในช่วงอัตราการผลิตต่างๆ ให้มีความหลากหลายขึ้นได้อีก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2541. **วิศวกรรมการประปา**. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัทมิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ทรงศิริ แต่สมบัติ. 2548. **การวิเคราะห์การถดถอย**. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นวรรตน์ จันทรกระเวน. 2548. **การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเนียนลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจร: กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปารเมศ ชุติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ปาณิกา เสนาคนตรี. 2549. **การพัฒนาประสิทธิภาพงานหล่อเครื่องประดับด้วยการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง กรณีศึกษา: โรงงานเครื่องประดับ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

มันสิน ตันทุลเวศม์. 2537. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 1**. สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิยะดา ตันวัฒนากุล. 2546. **การวิเคราะห์ความสัมพันธ์สมการถดถอยชนิดต่างๆ และการวิเคราะห์ปัจจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. หน่วยพิมพ์เอกสาร คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิเชียร สมบุญ. 2547. **การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่บ่งชี้คุณภาพแม่น้ำทางสถิติ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

โสภณ เอียดประพาล. 2545. การศึกษาเกณฑ์การควบคุม และ ประสิทธิภาพของถังกำจัดความขุ่นแบบใช้ชั้นตะกอนในระบบปรับคุณภาพน้ำ โรงงานผลิตน้ำประปาแพ่งพวย จังหวัดราชบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัจฉริยา. 2547. เทคนิคการวิเคราะห์สถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS ทฤษฎีและภาคปฏิบัติ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Degremont. 1979. **Water Treatment Handbook**. 5th ed. John Wiley and Sons, New York.

Doolana, M.C., Kalyanasundaram, S., Hodgson, P. and Hall, M.C. 2001. Identifying variation in sheet metal stamping. **Journal of Materials Processing Technology**. 115: 142-146.

J.O Odigure, A.B. Abubakar and A.S. Kovo. 2005. Modeling of Water Turbidity Parameters in a Water Treatment Plant. **AU J. T.** 8(4): 203-206.

Montgomery, D.C. 2001. **Design and Analysis of Experiment**. 5th ed., John Wiley and Sons (Asia) Pte.

Ross, P. J. 1988. **Taguchi Techniques for Quality Engineering Loss Function Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design**. McGraw-Hill, New York.

Surat Intro. 2005. **Effects of pulsation rate, surface overflow rate and suction height on the turbidity removal efficiency of pulsator clarifier**. M.S. thesis, Mahidol university.

Vedat Uyak, Kadir Ozdemir, Ismail Toroz . 2007. Multiple linear regression modeling of disinfection by-products formation in Istanbul drinking water reservoirs. **Total Science of The Environment**. 378: 269-280.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แสดงข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบ

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบและปริมาณขนาดการใช้สารส้มที่เหมาะสม ปี
2549 - 2550

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
1	25	8.12	123	122	14.32	1.155943	29	26	8.24	107	108	12.81	1.107549
2	22	8.14	122	126	14.64	1.165541	30	26	8.26	104	116	13.95	1.144574
3	26	8.12	113	112	13.93	1.143951	31	27	8.27	102	102	14.38	1.157759
4	28	8.19	111	112	13.87	1.142076	32	29	8.19	103	120	14.63	1.165244
5	25	8.13	104	116	14.13	1.150142	33	32	8.22	102	104	14.17	1.151370
6	29	8.14	108	114	14.11	1.149527	34	36	8.26	104	102	15.00	1.176091
7	30	8.15	107	104	12.90	1.110590	35	27	8.19	105	104	13.49	1.130012
8	36	8.15	103	106	14.73	1.168203	36	28	8.16	104	102	13.61	1.133858
9	33	8.20	103	104	13.70	1.136721	37	28	8.14	103	104	13.69	1.136403
10	26	8.19	104	100	14.53	1.162266	38	33	8.24	104	110	15.77	1.197832
11	32	8.28	105	106	13.78	1.139249	39	24	8.22	100	104	13.30	1.123852
12	35	8.28	103	102	16.15	1.208173	40	36	8.26	102	102	14.19	1.151982
13	28	8.23	101	104	13.39	1.126781	41	22	8.27	97	100	13.54	1.131619
14	33	8.20	107	112	13.69	1.136403	42	25	8.23	99	106	13.14	1.118595
15	28	8.17	108	106	13.27	1.122871	43	29	8.26	100	100	14.30	1.155336
16	32	8.21	111	108	14.63	1.165244	44	29	8.16	98	102	13.39	1.126781
17	30	8.27	107	106	14.15	1.150756	45	26	8.18	97	98	13.81	1.140194
18	36	8.25	107	110	14.42	1.158965	46	33	8.11	101	102	14.91	1.173478
19	30	8.26	106	104	13.57	1.132580	47	25	8.09	104	104	12.91	1.110926
20	34	8.19	104	108	14.23	1.153205	48	28	8.13	100	120	14.46	1.160168
21	27	8.25	109	106	14.03	1.147058	49	24	8.18	99	98	13.30	1.123852
22	29	8.25	105	110	14.33	1.156246	50	25	8.22	99	96	14.66	1.166134
23	28	8.31	105	104	13.78	1.139249	51	24	8.12	99	96	14.13	1.150142
24	27	8.30	104	100	13.83	1.140822	52	27	8.21	96	92	14.13	1.150142
25	24	8.24	102	104	13.96	1.144885	53	23	8.20	96	98	13.04	1.115278
26	26	8.11	105	108	14.89	1.172895	54	24	8.19	100	100	13.62	1.134177
27	30	8.11	108	112	12.84	1.108565	55	26	8.23	97	108	13.51	1.130655
28	28	8.18	110	110	14.50	1.161368	56	24	8.14	101	104	13.42	1.127753

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
57	27	8.22	101	100	13.41	1.127429	85	22	8.24	90	92	13.99	1.145818
58	27	8.22	99	104	14.43	1.159266	86	22	8.24	90	96	14.26	1.154120
59	27	8.27	96	100	13.65	1.135133	87	24	8.23	90	100	13.33	1.124830
60	28	8.22	103	108	13.94	1.144263	88	27	8.21	94	94	13.43	1.128076
61	26	8.26	98	104	13.69	1.136403	89	27	8.21	91	92	14.48	1.160769
62	25	8.25	102	114	15.00	1.176091	90	23	8.16	91	100	12.67	1.102777
63	25	8.24	98	98	15.27	1.183839	91	22	8.17	91	92	13.09	1.116940
64	26	8.26	97	100	13.33	1.124830	92	23	8.20	94	92	13.78	1.139249
65	25	8.22	98	106	14.04	1.147367	93	21	8.24	91	92	13.17	1.119586
66	27	8.26	95	104	14.33	1.156246	94	24	8.29	90	96	15.19	1.181558
67	24	8.32	96	94	13.83	1.140822	95	23	8.29	91	90	13.30	1.123852
68	27	8.28	97	96	14.75	1.168792	96	24	8.26	91	92	13.33	1.124830
69	22	8.31	97	94	13.66	1.135451	97	20	8.27	91	88	14.09	1.148911
70	26	8.31	97	100	14.58	1.163758	98	23	8.31	89	94	14.09	1.148911
71	22	8.35	94	96	13.72	1.137354	99	24	8.28	91	92	13.64	1.134814
72	27	8.26	93	94	13.47	1.129368	100	27	8.24	88	86	14.67	1.166430
73	24	8.25	93	110	13.28	1.123198	101	24	8.16	90	88	13.55	1.131939
74	27	8.20	87	94	13.75	1.138303	102	27	8.22	91	98	14.89	1.172895
75	25	8.18	88	94	12.95	1.112270	103	24	8.26	94	92	13.69	1.136403
76	24	8.13	90	90	13.33	1.124830	104	25	8.28	92	92	14.64	1.165541
77	25	8.26	86	90	13.11	1.117603	105	20	8.26	93	94	12.95	1.112270
78	27	8.25	90	98	14.55	1.162863	106	23	8.16	94	96	14.68	1.166726
79	25	8.33	94	90	13.48	1.129690	107	17	8.09	94	92	12.83	1.108227
80	26	8.29	90	100	14.00	1.146128	108	23	8.12	88	92	12.82	1.107888
81	22	8.29	91	92	12.87	1.109579	109	19	8.09	92	94	12.55	1.098644
82	22	8.27	91	100	14.41	1.158664	110	25	8.13	94	108	15.32	1.185259
83	24	8.29	91	96	12.32	1.090611	111	19	8.10	91	92	13.71	1.137037
84	24	8.22	91	96	13.95	1.144574	112	19	8.11	91	92	12.55	1.098644

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
113	20	8.20	90	88	13.43	1.128076	141	26	8.15	84	88	13.33	1.124830
114	25	8.29	88	92	14.85	1.171726	142	27	8.12	85	102	13.75	1.138303
115	29	8.26	89	92	13.82	1.140508	143	34	8.12	87	84	13.33	1.124830
116	49	8.26	87	96	18.50	1.267172	144	29	8.08	86	90	13.25	1.122216
117	48	8.26	86	120	18.40	1.264818	145	25	8.16	85	90	12.34	1.091315
118	43	8.33	90	114	17.61	1.245759	146	26	8.23	91	98	12.62	1.101059
119	31	8.33	91	90	13.78	1.139249	147	23	8.23	89	90	13.23	1.121560
120	30	8.29	87	90	14.39	1.158061	148	35	8.32	87	90	14.18	1.151676
121	27	8.28	92	92	13.58	1.132900	149	39	8.21	85	94	15.19	1.181558
122	27	8.26	90	110	13.69	1.136403	150	36	8.17	86	92	14.63	1.165244
123	27	8.23	93	90	13.97	1.145196	151	39	8.19	90	88	14.66	1.166134
124	31	8.27	91	96	13.93	1.143951	152	40	8.10	86	94	15.79	1.198382
125	27	8.25	90	90	13.27	1.122871	153	34	8.19	92	92	14.63	1.165244
126	29	8.21	91	94	13.66	1.135451	154	39	8.30	93	98	15.28	1.184123
127	27	8.23	92	90	14.15	1.150756	155	29	8.02	90	92	13.95	1.144574
128	30	8.16	88	90	13.72	1.137354	156	31	8.07	89	88	13.71	1.137037
129	30	8.26	87	96	13.05	1.115611	157	35	8.11	89	94	14.22	1.152900
130	30	8.18	89	98	13.63	1.134496	158	35	7.97	93	96	15.42	1.188084
131	26	8.21	87	90	13.04	1.115278	159	34	8.07	96	90	14.74	1.168497
132	24	8.26	86	88	13.24	1.121888	160	31	7.98	95	92	14.70	1.167317
133	24	8.34	86	88	13.07	1.116276	161	35	7.88	92	92	14.84	1.171434
134	19	8.33	90	92	12.31	1.090258	162	40	7.85	92	98	16.80	1.225309
135	26	8.25	91	90	13.20	1.120574	163	37	7.88	92	90	16.40	1.214844
136	26	8.25	95	98	13.20	1.120574	164	32	7.88	91	92	13.64	1.134814
137	23	8.32	95	98	12.68	1.103119	165	25	8.02	89	88	13.37	1.126131
138	27	8.21	94	102	13.43	1.128076	166	25	7.98	89	86	14.20	1.152288
139	29	8.24	91	92	13.85	1.141450	167	25	8.10	90	88	14.31	1.155640
140	22	8.27	90	96	13.24	1.121888	168	28	8.06	91	90	13.93	1.143951

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
169	27	8.13	91	86	14.26	1.154120	197	53	8.11	98	96	17.80	1.250420
170	29	8.14	92	92	15.35	1.186108	198	54	8.10	90	100	18.49	1.266937
171	28	7.97	89	88	13.54	1.131619	199	48	8.14	85	90	15.86	1.200303
172	34	7.87	81	88	15.33	1.185542	200	58	7.90	82	84	16.93	1.228657
173	25	7.85	81	80	12.69	1.103462	201	75	7.91	76	82	22.20	1.346353
174	34	7.88	83	88	14.84	1.171434	202	66	7.87	87	88	18.70	1.271842
175	34	7.94	83	82	13.37	1.126131	203	53	7.95	92	90	16.95	1.229170
176	32	7.99	84	86	13.30	1.123852	204	44	8.20	97	100	15.25	1.183270
177	28	7.97	83	82	12.56	1.098990	205	31	8.15	93	90	14.34	1.156549
178	30	7.97	84	94	14.19	1.151982	206	36	8.24	91	100	14.00	1.146128
179	23	8.03	83	84	12.39	1.093071	207	25	8.26	94	92	14.38	1.157759
180	31	7.87	82	90	13.21	1.120903	208	26	8.26	96	94	13.59	1.133219
181	32	7.79	90	86	13.33	1.124830	209	24	8.21	98	98	14.03	1.147058
182	35	7.76	89	94	16.35	1.213518	210	29	8.26	95	98	14.91	1.173478
183	43	7.73	87	86	15.72	1.196453	211	29	8.26	95	100	14.67	1.166430
184	43	7.73	84	90	17.03	1.231215	212	31	8.22	93	98	14.18	1.151676
185	38	7.84	82	88	14.24	1.153510	213	26	8.18	95	100	13.77	1.138934
186	40	7.85	85	88	16.74	1.223755	214	26	8.22	96	100	14.56	1.163161
187	57	7.84	88	98	18.73	1.272538	215	22	8.20	94	98	14.29	1.155032
188	56	7.75	86	88	19.29	1.285332	216	24	8.15	92	92	13.16	1.119256
189	50	7.90	87	86	17.67	1.247237	217	21	8.17	89	88	13.16	1.119256
190	47	7.83	86	96	17.57	1.244772	218	24	8.15	88	92	14.84	1.171434
191	45	8.07	82	90	17.21	1.235781	219	23	8.20	87	86	13.33	1.124830
192	62	7.84	81	92	19.48	1.289589	220	27	8.32	88	82	13.14	1.118595
193	64	7.74	79	80	20.88	1.319730	221	25	8.25	91	90	13.72	1.137354
194	99	7.55	79	88	30.14	1.479143	222	24	8.17	90	88	14.69	1.167022
195	83	7.69	90	98	27.50	1.439333	223	23	8.13	89	92	13.31	1.124178
196	67	7.87	98	96	19.09	1.280806	224	28	8.06	87	92	14.85	1.171726

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
225	26	8.12	87	90	13.17	1.119586	253	20	8.22	94	92	13.27	1.122871
226	26	8.18	87	90	14.42	1.158965	254	25	8.21	91	90	13.73	1.137671
227	25	8.22	87	92	13.14	1.118595	255	21	8.18	94	90	12.67	1.102777
228	27	8.18	85	86	13.94	1.144263	256	22	8.07	93	96	13.68	1.136086
229	24	8.14	84	80	12.65	1.102091	257	20	8.16	88	90	13.35	1.125481
230	32	7.99	83	84	14.27	1.154424	258	24	8.13	87	86	14.61	1.164650
231	34	8.04	81	84	14.13	1.150142	259	24	8.18	90	92	12.64	1.101747
232	37	8.03	83	86	14.51	1.161667	260	22	8.14	91	88	13.77	1.138934
233	36	8.16	84	84	14.81	1.170555	261	22	8.15	90	90	13.22	1.121231
234	38	8.07	83	80	14.71	1.167613	262	27	8.18	89	94	14.38	1.157759
235	30	8.05	88	88	13.65	1.135133	263	28	8.21	92	90	13.09	1.116940
236	34	8.10	86	82	13.24	1.121888	264	25	8.23	93	88	13.43	1.128076
237	29	8.20	86	88	13.40	1.127105	265	21	8.22	92	92	13.73	1.137671
238	29	8.16	87	90	14.81	1.170555	266	30	7.96	91	98	14.10	1.149219
239	28	8.11	87	94	13.04	1.115278	267	25	7.99	91	94	13.55	1.131939
240	34	8.14	85	84	13.88	1.142389	268	26	8.09	91	98	13.75	1.138303
241	26	8.18	87	82	12.91	1.110926	269	24	8.06	92	96	13.82	1.140508
242	27	8.04	85	88	13.95	1.144574	270	34	8.02	91	98	15.00	1.176091
243	26	8.08	85	86	13.24	1.121888	271	23	8.06	94	94	13.93	1.143951
244	30	8.08	95	90	13.50	1.130334	272	25	7.98	96	94	13.02	1.114611
245	27	8.01	90	90	13.36	1.125806	273	26	8.15	97	96	13.91	1.143327
246	26	8.01	89	96	12.95	1.112270	274	24	8.17	100	102	14.93	1.174060
247	24	8.11	90	90	13.07	1.116276	275	23	8.18	107	102	13.73	1.137671
248	28	8.25	88	86	13.51	1.130655	276	25	8.18	101	104	14.76	1.169086
249	21	8.30	89	96	13.58	1.132900	277	23	8.15	100	100	13.15	1.118926
250	21	8.30	92	92	13.90	1.143015	278	26	8.06	106	110	13.59	1.133219
251	22	8.27	92	96	13.51	1.130655	279	21	8.07	108	106	13.63	1.134496
252	25	8.21	91	90	13.60	1.133539	280	22	7.97	106	108	13.22	1.121231

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
281	21	8.15	105	108	13.65	1.135133	309	19	8.28	135	134	14.74	1.168497
282	28	8.17	109	118	13.48	1.129690	310	19	8.31	132	134	15.20	1.181844
283	20	8.23	114	114	14.35	1.156852	311	20	8.32	138	132	15.34	1.185825
284	24	8.19	117	124	14.34	1.156549	312	21	8.30	129	142	14.58	1.163758
285	20	8.22	118	120	14.05	1.147676	313	20	8.14	126	124	14.58	1.163758
286	23	8.21	121	120	14.90	1.173186	314	24	8.21	124	126	14.86	1.172019
287	21	8.19	127	126	14.20	1.152288	315	21	8.31	127	124	14.93	1.174060
288	27	8.29	121	124	14.55	1.162863	316	23	8.26	124	122	14.33	1.156246
289	24	8.10	120	124	14.38	1.157759	317	21	8.27	118	118	14.91	1.173478
290	28	8.08	128	120	14.53	1.162266	318	27	8.23	117	120	14.62	1.164947
291	30	8.07	123	124	15.85	1.200029	319	22	8.28	115	114	14.68	1.166726
292	28	8.11	122	126	13.53	1.131298	320	24	8.31	114	118	14.58	1.163758
293	29	8.06	120	124	14.77	1.169380	321	22	8.23	114	110	14.78	1.169674
294	34	8.04	123	124	14.21	1.152594	322	30	8.22	116	118	16.00	1.204120
295	49	7.95	119	118	18.39	1.264582	323	26	8.18	117	114	14.76	1.169086
296	55	7.98	122	122	19.29	1.285332	324	26	8.15	113	114	13.79	1.139564
297	54	8.01	120	122	19.17	1.282622	325	25	8.16	115	112	14.55	1.162863
298	58	8.12	123	126	21.65	1.335458	326	30	8.13	116	116	14.93	1.174060
299	43	8.23	130	130	17.43	1.241297	327	29	8.17	125	118	14.77	1.169380
300	41	8.31	127	132	17.05	1.231724	328	26	8.21	119	120	14.43	1.159266
301	26	8.18	128	132	13.75	1.138303	329	22	8.21	119	116	14.85	1.171726
302	37	8.26	133	140	17.29	1.237795	330	25	8.22	118	112	16.00	1.204120
303	21	8.24	136	134	16.25	1.210853	331	20	8.28	114	102	14.12	1.149835
304	23	8.27	137	134	15.67	1.195069	332	23	8.22	114	112	13.21	1.120903
305	18	8.24	138	134	14.55	1.162863	333	19	8.14	114	110	14.24	1.153510
306	23	8.28	135	138	14.91	1.173478	334	26	8.08	114	110	14.94	1.174351
307	18	8.24	138	136	15.00	1.176091	335	23	8.00	114	112	14.04	1.147367
308	18	8.29	138	138	14.56	1.163161	336	21	8.05	115	114	14.57	1.163460

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
337	27	8.11	114	118	14.39	1.158061	365	22	8.11	123	126	14.10	1.149219
338	23	8.12	114	110	13.75	1.138303	366	21	8.12	123	120	13.73	1.137671
339	26	8.10	114	112	13.59	1.133219	367	22	8.07	119	138	13.75	1.138303
340	19	8.10	111	110	14.42	1.158965	368	21	8.07	118	118	14.00	1.146128
341	28	8.13	115	118	15.23	1.182700	369	24	8.05	116	118	13.65	1.135133
342	17	8.27	115	116	13.29	1.123525	370	20	7.99	116	112	13.47	1.129368
343	23	8.11	117	118	13.00	1.113943	371	23	8.01	115	118	13.66	1.135451
344	21	8.04	111	110	14.06	1.147985	372	20	8.05	115	118	14.09	1.148911
345	21	8.03	113	112	14.42	1.158965	373	23	8.05	116	122	13.26	1.122544
346	21	8.05	112	112	14.02	1.146748	374	24	7.99	116	116	13.62	1.134177
347	23	8.06	111	108	13.19	1.120245	375	25	8.06	112	108	13.33	1.124830
348	20	8.06	111	110	13.79	1.139564	376	23	8.26	113	116	13.65	1.135133
349	22	8.15	112	108	14.50	1.161368	377	20	8.21	116	120	13.75	1.138303
350	19	8.19	118	112	13.77	1.138934	378	24	8.28	116	114	13.09	1.116940
351	22	8.13	116	114	13.51	1.130655	379	25	8.25	116	118	13.68	1.136086
352	19	8.10	115	114	14.00	1.146128	380	24	8.21	114	120	13.75	1.138303
353	22	8.20	115	118	13.98	1.145507	381	26	8.23	116	116	13.82	1.140508
354	20	8.16	118	118	14.10	1.149219	382	25	8.18	116	114	13.68	1.136086
355	20	8.13	118	118	14.07	1.148294	383	28	8.14	113	108	13.20	1.120574
356	19	8.13	117	116	14.47	1.160469	384	28	8.15	111	110	13.24	1.121888
357	24	8.18	118	122	15.17	1.180986	385	34	8.16	111	118	14.55	1.162863
358	18	8.14	118	120	14.51	1.161667	386	29	8.22	112	110	13.69	1.136403
359	19	8.11	118	122	13.75	1.138303	387	35	8.18	110	116	14.25	1.153815
360	18	8.11	117	136	14.19	1.151982	388	30	8.14	109	112	13.05	1.115611
361	19	8.12	123	120	13.90	1.143015	389	35	8.07	107	118	15.06	1.177825
362	20	8.03	119	120	14.42	1.158965	390	32	8.09	108	106	13.04	1.115278
363	22	8.02	118	120	12.97	1.112940	391	33	8.14	110	112	14.00	1.146128
364	20	8.11	119	124	13.96	1.144885	392	27	8.16	109	110	13.75	1.138303

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
337	27	8.11	114	118	14.39	1.158061	365	22	8.11	123	126	14.10	1.149219
338	23	8.12	114	110	13.75	1.138303	366	21	8.12	123	120	13.73	1.137671
339	26	8.10	114	112	13.59	1.133219	367	22	8.07	119	138	13.75	1.138303
340	19	8.10	111	110	14.42	1.158965	368	21	8.07	118	118	14.00	1.146128
341	28	8.13	115	118	15.23	1.182700	369	24	8.05	116	118	13.65	1.135133
342	17	8.27	115	116	13.29	1.123525	370	20	7.99	116	112	13.47	1.129368
343	23	8.11	117	118	13.00	1.113943	371	23	8.01	115	118	13.66	1.135451
344	21	8.04	111	110	14.06	1.147985	372	20	8.05	115	118	14.09	1.148911
345	21	8.03	113	112	14.42	1.158965	373	23	8.05	116	122	13.26	1.122544
346	21	8.05	112	112	14.02	1.146748	374	24	7.99	116	116	13.62	1.134177
347	23	8.06	111	108	13.19	1.120245	375	25	8.06	112	108	13.33	1.124830
348	20	8.06	111	110	13.79	1.139564	376	23	8.26	113	116	13.65	1.135133
349	22	8.15	112	108	14.50	1.161368	377	20	8.21	116	120	13.75	1.138303
350	19	8.19	118	112	13.77	1.138934	378	24	8.28	116	114	13.09	1.116940
351	22	8.13	116	114	13.51	1.130655	379	25	8.25	116	118	13.68	1.136086
352	19	8.10	115	114	14.00	1.146128	380	24	8.21	114	120	13.75	1.138303
353	22	8.20	115	118	13.98	1.145507	381	26	8.23	116	116	13.82	1.140508
354	20	8.16	118	118	14.10	1.149219	382	25	8.18	116	114	13.68	1.136086
355	20	8.13	118	118	14.07	1.148294	383	28	8.14	113	108	13.20	1.120574
356	19	8.13	117	116	14.47	1.160469	384	28	8.15	111	110	13.24	1.121888
357	24	8.18	118	122	15.17	1.180986	385	34	8.16	111	118	14.55	1.162863
358	18	8.14	118	120	14.51	1.161667	386	29	8.22	112	110	13.69	1.136403
359	19	8.11	118	122	13.75	1.138303	387	35	8.18	110	116	14.25	1.153815
360	18	8.11	117	136	14.19	1.151982	388	30	8.14	109	112	13.05	1.115611
361	19	8.12	123	120	13.90	1.143015	389	35	8.07	107	118	15.06	1.177825
362	20	8.03	119	120	14.42	1.158965	390	32	8.09	108	106	13.04	1.115278
363	22	8.02	118	120	12.97	1.112940	391	33	8.14	110	112	14.00	1.146128
364	20	8.11	119	124	13.96	1.144885	392	27	8.16	109	110	13.75	1.138303

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
393	34	8.21	107	116	13.00	1.113943	421	36	8.38	103	106	14.36	1.157154
394	30	8.17	106	106	12.50	1.096910	422	31	8.33	100	102	13.50	1.130334
395	30	8.20	104	106	13.15	1.118926	423	34	8.35	101	102	13.67	1.135769
396	28	8.20	103	106	13.00	1.113943	424	31	8.35	101	100	13.54	1.131619
397	29	8.21	109	118	12.43	1.094471	425	33	8.33	101	106	14.25	1.153815
398	30	8.28	107	110	12.79	1.106871	426	34	8.34	102	102	13.64	1.134814
399	26	8.28	110	114	13.22	1.121231	427	38	8.38	100	100	15.22	1.182415
400	22	8.33	109	110	13.44	1.128399	428	31	8.37	100	100	14.04	1.147367
401	29	8.28	107	114	14.07	1.148294	429	32	8.34	104	104	13.86	1.141763
402	23	8.30	105	108	13.29	1.123525	430	31	8.34	104	100	13.78	1.139249
403	26	8.32	105	114	12.81	1.107549	431	30	8.38	100	108	13.38	1.126456
404	22	8.28	107	104	13.22	1.121231	432	27	8.35	102	106	13.38	1.126456
405	24	8.24	105	108	13.50	1.130334	433	32	8.37	103	102	13.86	1.141763
406	22	8.29	109	110	13.08	1.116608	434	27	8.44	102	104	12.60	1.100371
407	26	8.31	106	106	13.38	1.126456	435	30	8.40	101	102	13.22	1.121231
408	22	8.30	106	104	13.27	1.122871	436	27	8.36	99	100	13.96	1.144885
409	26	8.33	107	110	14.17	1.151370	437	30	8.28	100	108	13.96	1.144885
410	23	8.34	110	106	13.68	1.136086	438	27	8.33	102	104	13.11	1.117603
411	25	8.40	106	110	13.63	1.134496	439	30	8.32	100	104	13.20	1.120574
412	24	8.44	106	106	13.20	1.120574	440	31	8.30	99	98	13.78	1.139249
413	33	8.34	106	108	14.70	1.167317	441	32	8.29	100	106	14.70	1.167317
414	28	8.34	102	104	13.42	1.127753	442	30	8.32	100	100	13.80	1.139879
415	32	8.31	99	102	14.94	1.174351	443	34	8.33	98	98	15.14	1.180126
416	29	8.33	100	104	13.25	1.122216	444	28	8.27	97	104	12.32	1.090611
417	33	8.31	101	108	14.17	1.151370	445	38	8.29	100	118	14.15	1.150756
418	32	8.45	103	102	13.42	1.127753	446	30	8.26	104	100	12.92	1.111263
419	34	8.44	101	104	13.14	1.118595	447	35	8.30	100	114	13.70	1.136721
420	32	8.44	100	102	13.63	1.134496	448	28	8.31	99	100	12.96	1.112605

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
449	32	8.37	100	106	13.69	1.136403	477	33	8.08	92	100	14.06	1.147985
450	28	8.38	97	96	13.77	1.138934	478	50	7.98	98	94	16.89	1.227630
451	36	8.42	97	114	14.19	1.151982	479	56	7.98	94	96	17.32	1.238548
452	26	8.41	99	104	13.88	1.142389	480	50	7.97	95	96	14.79	1.169968
453	34	8.41	98	96	15.56	1.192010	481	55	8.17	91	90	16.76	1.224274
454	31	8.36	101	100	12.97	1.112940	482	36	8.20	92	92	13.66	1.135451
455	42	8.40	101	100	16.10	1.206826	483	35	8.25	89	92	13.26	1.122544
456	36	8.39	98	96	13.89	1.142702	484	30	8.23	89	88	13.16	1.119256
457	41	8.49	98	120	15.97	1.203305	485	37	8.08	86	88	13.50	1.130334
458	37	8.46	99	100	14.44	1.159567	486	26	7.91	88	90	11.94	1.077004
459	40	8.18	98	114	14.54	1.162564	487	31	7.66	89	100	14.44	1.159567
460	31	8.16	97	110	13.23	1.121560	488	28	7.50	86	90	14.00	1.146128
461	35	8.17	96	98	14.29	1.155032	489	36	7.44	89	90	13.33	1.124830
462	36	8.08	94	98	13.38	1.126456	490	31	7.53	87	90	13.83	1.140822
463	43	8.07	92	98	15.47	1.189490	491	32	7.52	85	90	12.94	1.111934
464	33	8.07	90	102	13.96	1.144885	492	35	7.48	85	86	13.57	1.132580
465	33	8.04	92	104	13.14	1.118595	493	39	7.55	87	96	14.75	1.168792
466	33	8.07	90	92	13.18	1.119915	494	35	7.65	86	92	14.64	1.165541
467	30	8.04	90	92	13.45	1.128722	495	33	7.60	93	94	13.94	1.144263
468	28	8.14	92	92	12.57	1.099335	496	25	7.68	91	96	13.31	1.124178
469	28	8.13	92	100	13.17	1.119586	497	35	7.58	93	96	13.78	1.139249
470	27	8.18	90	90	12.38	1.092721	498	40	7.61	93	90	14.40	1.158362
471	28	8.19	88	88	12.10	1.082785	499	27	7.67	92	98	12.29	1.089552
472	25	8.19	89	88	13.14	1.118595	500	32	7.59	93	90	13.76	1.138618
473	28	8.15	92	102	12.93	1.111599	501	34	7.59	91	98	14.73	1.168203
474	23	8.13	91	92	13.50	1.130334	502	49	7.57	90	96	15.69	1.195623
475	32	8.02	89	92	13.68	1.136086	503	40	7.69	94	90	13.89	1.142702
476	28	8.02	89	90	13.86	1.141763	504	38	7.74	91	90	14.64	1.165541

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
505	44	7.76	95	98	14.90	1.173186	533	37	8.30	97	100	15.97	1.203305
506	37	7.78	95	96	16.09	1.206556	534	30	8.28	96	96	14.13	1.150142
507	44	7.80	93	96	15.15	1.180413	535	26	8.34	98	102	11.96	1.077731
508	44	7.87	91	100	15.75	1.197281	536	24	8.26	94	94	13.33	1.124830
509	72	7.69	97	94	20.87	1.319522	537	36	8.27	98	102	13.90	1.143015
510	80	7.66	97	98	22.64	1.354876	538	27	8.26	102	102	14.04	1.147367
511	84	7.71	97	94	24.40	1.387390	539	32	8.24	101	98	13.15	1.118926
512	64	7.75	93	94	17.88	1.252368	540	30	8.18	101	98	13.22	1.121231
513	63	7.77	95	96	16.74	1.223755	541	38	8.17	100	98	14.03	1.147058
514	44	7.84	97	98	13.67	1.135769	542	29	8.17	102	98	13.86	1.141763
515	45	7.94	97	102	14.79	1.169968	543	33	8.16	101	108	12.86	1.109241
516	34	8.00	96	96	14.03	1.147058	544	30	8.13	101	104	13.97	1.145196
517	38	7.99	102	100	14.73	1.168203	545	42	8.17	100	104	15.52	1.190892
518	25	7.99	98	96	12.74	1.105169	546	38	8.21	106	104	14.61	1.164650
519	30	7.99	94	96	13.34	1.125156	547	32	8.29	104	100	14.46	1.160168
520	24	8.00	91	94	13.44	1.128399	548	30	8.24	99	102	13.38	1.126456
521	28	8.14	92	94	14.09	1.148911	549	35	8.22	105	112	14.28	1.154728
522	28	8.25	93	96	12.40	1.093422	550	27	8.19	105	108	13.77	1.138934
523	32	8.30	94	100	13.25	1.122216	551	29	8.25	105	106	13.15	1.118926
524	24	8.33	97	96	13.18	1.119915	552	26	8.21	104	114	13.50	1.130334
525	33	8.32	103	98	13.93	1.143951	553	37	8.22	108	108	13.35	1.125481
526	28	8.35	97	98	14.00	1.146128	554	30	8.28	108	104	14.19	1.151982
527	31	8.32	96	102	13.50	1.130334	555	29	8.24	105	114	13.00	1.113943
528	26	8.31	96	96	13.24	1.121888	556	28	8.10	105	106	13.66	1.135451
529	31	8.32	97	98	13.90	1.143015	557	35	8.20	108	110	13.93	1.143951
530	30	8.31	102	102	14.27	1.154424	558	31	8.30	111	110	14.52	1.161967
531	31	8.37	101	104	14.29	1.155032	559	27	8.31	108	106	14.52	1.161967
532	26	8.33	97	96	13.59	1.133219	560	25	8.28	105	106	14.25	1.153815

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
561	34	8.12	99	108	14.42	1.158965	589	30	8.11	115	118	14.16	1.151063
562	73	7.91	89	88	19.09	1.280806	590	32	8.19	115	114	14.38	1.157759
563	87	7.94	91	100	26.88	1.429429	591	35	8.25	111	112	14.13	1.150142
564	60	7.90	95	102	18.91	1.276692	592	28	8.13	111	116	14.66	1.166134
565	56	7.94	103	106	17.88	1.252368	593	33	8.17	116	120	14.25	1.153815
566	50	8.09	106	110	16.26	1.211121	594	31	8.12	110	112	14.65	1.165838
567	65	8.17	106	110	18.62	1.269980	595	43	8.01	100	106	14.60	1.164353
568	35	8.33	109	102	14.48	1.160769	596	52	8.07	98	102	15.90	1.201397
569	34	8.23	110	106	14.08	1.148603	597	55	8.13	101	110	16.73	1.223496
570	33	8.34	108	110	14.83	1.171141	598	47	8.14	98	106	15.18	1.181272
571	29	8.29	106	106	14.08	1.148603	599	59	8.10	101	104	17.00	1.230449
572	27	8.21	107	110	14.12	1.149835	600	38	8.07	101	104	13.94	1.144263
573	30	8.24	109	110	14.70	1.167317	601	40	8.21	109	110	14.34	1.156549
574	32	8.27	113	114	14.62	1.164947	602	32	8.26	113	110	14.68	1.166726
575	34	8.23	109	110	14.29	1.155032	603	33	8.27	109	106	14.23	1.153205
576	30	8.23	109	112	14.29	1.155032	604	31	8.37	103	108	14.31	1.155640
577	30	8.27	114	114	14.61	1.164650	605	32	8.32	108	110	15.30	1.184691
578	27	8.26	110	114	14.75	1.168792	606	34	8.24	107	106	14.34	1.156549
579	32	8.25	110	110	14.23	1.153205	607	39	8.19	110	112	14.67	1.166430
580	26	8.28	111	110	14.06	1.147985	608	27	8.17	107	104	14.57	1.163460
581	31	8.28	116	116	14.62	1.164947	609	32	8.22	108	110	15.57	1.192289
582	30	8.32	116	116	14.62	1.164947	610	32	8.22	104	104	14.28	1.154728
583	28	8.29	115	114	14.41	1.158664	611	34	8.16	107	102	14.53	1.162266
584	26	8.23	112	114	14.61	1.164650	612	29	8.12	107	108	14.40	1.158362
585	36	8.12	116	116	14.66	1.166134	613	35	8.23	116	108	14.14	1.150449
586	30	8.12	115	114	14.48	1.160769	614	25	8.27	114	110	14.44	1.159567
587	35	8.13	114	114	14.23	1.153205	615	28	8.34	112	112	14.68	1.166726
588	29	8.12	113	116	14.30	1.155336	616	27	8.15	109	114	14.59	1.164055

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
617	36	8.30	108	114	14.31	1.155640	645	42	8.21	109	106	14.92	1.173769
618	33	8.24	106	106	14.53	1.162266	646	36	8.19	105	108	15.57	1.192289
619	34	8.23	109	110	15.00	1.176091	647	39	8.20	107	110	15.30	1.184691
620	32	8.25	107	108	14.61	1.164650	648	34	8.17	104	106	14.38	1.157759
621	35	8.33	110	114	15.14	1.180126	649	35	8.13	108	112	15.00	1.176091
622	30	8.19	107	112	15.26	1.183555	650	32	8.10	107	108	14.79	1.169968
623	40	8.21	107	112	15.91	1.201670	651	33	8.09	107	110	13.38	1.126456
624	36	8.22	107	108	14.52	1.161967	652	35	8.08	104	108	14.69	1.167022
625	48	8.09	105	108	16.43	1.215638	653	44	7.95	102	108	15.75	1.197281
626	42	8.09	107	108	15.47	1.189490	654	47	8.10	107	108	15.82	1.199206
627	46	8.13	107	110	16.43	1.215638	655	47	8.04	105	108	15.90	1.201397
628	38	8.24	106	108	14.90	1.173186	656	48	8.10	102	110	14.89	1.172895
629	45	8.12	109	110	15.79	1.198382	657	46	8.09	107	114	16.94	1.228913
630	39	8.19	109	112	15.65	1.194514	658	63	8.02	104	108	19.29	1.285332
631	39	8.24	109	110	14.29	1.155032	659	78	8.01	102	104	23.29	1.367169
632	30	8.28	107	106	15.29	1.184407	660	63	8.05	101	110	18.75	1.273001
633	31	8.26	108	108	14.45	1.159868	661	69	8.04	105	118	21.44	1.331225
634	33	8.19	109	110	15.19	1.181558	662	67	8.05	106	106	19.60	1.292256
635	43	8.18	107	110	14.57	1.163460	663	73	8.04	105	112	21.75	1.337459
636	46	8.10	104	114	14.66	1.166134	664	64	8.05	104	104	20.55	1.312812
637	53	8.15	106	110	18.00	1.255273	665	75	8.06	113	112	24.38	1.387034
638	51	8.19	105	114	15.38	1.186956	666	62	8.12	113	114	18.75	1.273001
639	52	8.19	105	108	17.45	1.241795	667	61	8.08	110	114	18.75	1.273001
640	45	8.21	103	106	15.40	1.187521	668	48	8.02	109	122	16.50	1.217484
641	44	8.16	105	112	14.91	1.173478	669	52	8.09	113	114	17.40	1.240549
642	39	8.19	108	104	15.07	1.178113	670	37	8.12	121	118	14.91	1.173478
643	41	8.20	105	108	15.58	1.192567	671	36	8.17	118	120	15.25	1.183270
644	40	8.19	105	110	14.28	1.154728	672	31	8.26	114	116	14.31	1.155640

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
673	31	8.26	118	116	14.64	1.165541	702	33	8.19	105	110	14.29	1.155032
674	26	8.25	113	112	14.62	1.164947	703	38	8.18	105	114	15.59	1.192846
675	27	8.37	116	116	13.46	1.129045	704	33	8.26	105	110	14.22	1.152900
676	24	8.35	113	118	14.18	1.151676	705	35	8.22	106	108	15.00	1.176091
677	26	8.28	117	120	14.90	1.173186	706	34	8.18	104	102	14.13	1.150142
678	25	8.32	115	114	14.66	1.166134	707	34	8.21	108	108	14.88	1.172603
679	27	8.43	113	114	14.75	1.168792	708	31	8.19	105	106	12.60	1.100371
680	24	8.37	111	112	14.29	1.155032	709	33	8.17	108	108	13.70	1.136721
681	26	8.30	113	114	14.61	1.164650	710	36	8.21	107	104	14.87	1.172311
682	27	8.23	111	112	14.31	1.155640	711	39	8.18	106	112	14.60	1.164353
683	31	8.24	108	116	15.56	1.192010	712	33	8.16	105	106	13.55	1.131939
684	27	8.27	109	116	14.06	1.147985	713	37	8.14	111	110	13.97	1.145196
685	25	8.22	112	118	14.33	1.156246	714	34	8.13	112	110	14.31	1.155640
686	28	8.26	107	108	14.54	1.162564	715	38	8.14	112	112	14.65	1.165838
687	30	8.18	106	110	14.86	1.172019	716	33	8.18	109	112	13.91	1.143327
688	27	8.24	103	100	13.36	1.125806	717	37	8.11	109	118	14.25	1.153815
689	34	8.18	109	110	14.06	1.147985	718	34	8.14	108	112	13.91	1.143327
690	27	8.15	108	112	13.44	1.128399	719	35	8.13	109	116	14.55	1.162863
691	30	8.21	107	114	14.00	1.146128	720	31	8.12	108	108	13.42	1.127753
692	27	8.23	104	110	13.56	1.132260	721	33	8.16	113	110	13.95	1.144574
693	34	8.27	109	106	13.69	1.136403	722	31	8.19	112	104	13.13	1.118265
694	31	8.31	108	106	14.43	1.159266	723	38	8.16	111	106	14.20	1.152288
695	28	8.23	103	114	13.85	1.141450	724	30	8.18	111	108	14.44	1.159567
696	30	8.22	102	104	13.26	1.122544	725	28	8.25	110	106	13.38	1.126456
697	36	8.16	105	114	13.97	1.145196	726	35	8.17	111	108	14.00	1.146128
698	32	8.18	111	108	14.61	1.164650	727	28	8.21	107	100	12.90	1.110590
699	34	8.15	109	112	14.27	1.154424	728	27	8.18	105	102	13.22	1.121231
700	33	8.22	108	110	15.29	1.184407	729	30	8.15	111	106	13.59	1.133219
701	35	8.20	107	112	14.40	1.158362	730	27	8.21	111	108	13.38	1.126456

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบและปริมาณขนาดการใช้สารส้มที่เหมาะสม
เดือน ม.ค. - ก.ค. 2551

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
1	30	8.24	112	106	13.40	1.12710	29	36	8.35	110	108	12.53	1.09793
2	24	8.24	108	110	13.41	1.12731	30	33	8.03	108	102	13.17	1.11971
3	26	8.18	108	112	13.42	1.12779	31	35	8.01	106	100	13.58	1.13287
4	27	8.22	110	108	13.80	1.13988	32	36	8.10	110	106	13.14	1.11869
5	27	8.20	114	106	13.00	1.11394	33	40	8.23	110	108	13.91	1.14330
6	26	8.23	108	108	13.57	1.13243	34	37	8.13	104	102	13.95	1.14457
7	30	8.17	110	110	13.83	1.14093	35	39	8.14	104	100	13.97	1.14506
8	26	8.15	106	110	13.50	1.13033	36	37	8.01	100	100	13.64	1.13470
9	28	8.18	112	104	12.55	1.09849	37	37	8.04	106	110	13.80	1.13988
10	23	8.18	110	112	12.86	1.10914	38	35	8.01	104	100	13.97	1.14506
11	24	8.15	110	116	12.27	1.08894	39	35	7.90	104	108	12.46	1.09552
12	26	8.18	116	114	13.09	1.11694	40	45	7.87	96	98	15.54	1.19145
13	26	8.20	118	116	13.09	1.11697	41	41	7.93	104	102	15.20	1.18184
14	26	8.12	110	112	13.04	1.11523	42	41	8.05	98	100	14.23	1.15320
15	31	8.14	112	100	13.58	1.13287	43	42	7.97	98	100	13.74	1.13789
16	29	8.06	106	104	13.64	1.13470	44	39	7.91	100	102	13.43	1.12803
17	30	8.14	110	110	13.50	1.13033	45	36	8.01	104	104	14.25	1.15381
18	29	8.09	106	104	13.17	1.11971	46	31	7.97	102	100	13.04	1.11539
19	32	8.08	108	108	13.83	1.14070	47	33	7.95	100	104	13.65	1.13513
20	28	8.12	106	104	12.21	1.08687	48	35	7.94	104	98	13.26	1.12265
21	31	8.11	108	108	12.55	1.09849	49	42	7.97	102	108	14.79	1.16984
22	30	8.11	106	114	13.24	1.12193	50	31	8.04	102	102	13.44	1.12840
23	32	8.07	104	118	13.75	1.13830	51	39	7.92	102	104	14.28	1.15473
24	34	8.08	110	108	13.89	1.14267	52	30	7.94	102	100	13.75	1.13830
25	34	8.17	112	110	13.31	1.12426	53	30	8.02	102	100	13.30	1.12399
26	30	8.07	104	110	13.50	1.13033	54	24	8.07	96	100	13.20	1.12057
27	31	8.04	104	110	13.42	1.12779	55	27	8.02	98	100	13.14	1.11853
28	34	8.14	106	108	13.57	1.13263	56	28	8.06	100	96	13.74	1.13805

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
57	35	8.06	104	98	13.25	1.12222	85	34	8.21	100	92	12.17	1.08517
58	29	7.99	100	98	13.33	1.12494	86	30	8.26	100	96	12.46	1.09557
59	27	7.97	102	102	13.26	1.12265	87	29	8.13	98	96	12.00	1.07918
60	29	7.95	98	98	13.30	1.12399	88	35	8.19	100	98	13.06	1.11590
61	29	8.04	104	98	12.84	1.10857	89	34	8.24	100	96	12.72	1.10449
62	24	8.01	96	94	12.43	1.09442	90	31	8.26	98	94	12.91	1.11103
63	31	8.06	100	98	14.22	1.15297	91	34	8.20	100	100	12.63	1.10123
64	26	8.05	100	96	12.78	1.10646	92	35	8.10	96	80	12.94	1.11193
65	28	8.09	102	110	12.60	1.10037	93	38	8.17	100	100	12.38	1.09255
66	24	8.10	100	98	12.60	1.10037	94	33	8.18	100	90	12.21	1.08672
67	30	8.04	100	98	13.43	1.12803	95	36	7.18	96	92	12.60	1.10037
68	27	8.09	98	92	13.75	1.13830	96	36	8.16	94	94	12.60	1.10037
69	30	8.06	100	96	12.91	1.11103	97	39	8.22	98	94	12.68	1.10312
70	28	8.01	96	100	13.35	1.12548	98	35	7.96	92	92	12.84	1.10857
71	32	7.99	98	102	13.42	1.12779	99	35	7.98	96	100	12.75	1.10551
72	28	8.01	100	100	12.67	1.10266	100	29	8.04	100	98	13.00	1.11394
73	27	8.03	102	104	12.32	1.09066	101	37	8.18	100	100	12.16	1.08486
74	28	8.16	98	100	13.20	1.12057	102	38	8.12	100	96	13.56	1.13226
75	32	8.12	100	98	13.50	1.13033	103	35	8.14	96	96	13.04	1.11523
76	32	8.14	96	94	13.38	1.12629	104	31	8.16	96	100	12.27	1.08894
77	32	8.23	100	94	12.46	1.09557	105	36	8.25	96	96	12.45	1.09517
78	27	8.24	98	104	12.00	1.07918	106	28	8.16	94	90	13.83	1.14070
79	30	8.19	100	106	12.65	1.10217	107	37	8.10	96	90	13.68	1.13609
80	29	8.21	100	94	13.57	1.13263	108	28	8.05	98	90	13.85	1.14154
81	33	8.24	100	98	12.50	1.09691	109	34	7.98	96	96	13.00	1.11394
82	29	8.29	96	94	12.95	1.11227	110	31	8.02	100	92	13.18	1.11998
83	30	8.22	100	96	12.17	1.08517	111	36	7.92	96	94	13.45	1.12887
84	33	8.22	98	100	12.39	1.09312	112	29	8.03	96	98	13.15	1.11905

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
113	33	8.22	98	100	13.34	1.12531	141	28	8.12	102	100	13.00	1.11394
114	30	8.14	96	92	12.95	1.11242	142	28	8.11	96	100	12.65	1.10209
115	39	8.01	98	96	13.54	1.13162	143	31	8.20	100	104	13.94	1.14430
116	27	8.19	100	98	13.34	1.12531	144	28	8.16	98	100	13.07	1.11632
117	29	8.12	98	92	13.03	1.11509	145	33	8.09	100	104	13.17	1.11971
118	24	8.06	94	94	11.96	1.07773	146	28	8.09	96	96	13.55	1.13189
119	30	7.94	94	96	13.78	1.13918	147	34	8.05	100	104	13.14	1.11860
120	25	8.05	94	96	13.31	1.12426	148	28	8.48	100	100	13.89	1.14257
121	34	8.19	100	100	13.43	1.12803	149	31	8.54	104	100	13.35	1.12564
122	29	8.14	92	96	13.08	1.11661	150	29	8.46	98	102	13.35	1.12564
123	45	7.91	96	96	16.16	1.20844	151	31	8.35	100	100	14.79	1.16984
124	36	8.16	94	94	13.43	1.12823	152	31	8.48	102	92	13.29	1.12338
125	39	8.20	98	96	12.68	1.10318	153	34	8.50	102	96	13.64	1.13470
126	32	8.20	94	94	13.50	1.13033	154	34	8.42	98	94	13.80	1.13988
127	33	8.12	96	96	13.92	1.14364	155	36	8.14	100	100	15.24	1.18298
128	30	8.12	96	104	13.60	1.13354	156	30	8.26	100	94	13.25	1.12222
129	32	8.24	104	100	13.62	1.13423	157	33	8.26	104	98	13.50	1.13033
130	29	8.30	98	96	13.55	1.13179	158	31	8.28	102	100	13.59	1.13334
131	33	8.34	100	96	14.07	1.14826	159	40	8.22	100	98	15.08	1.17840
132	32	8.27	94	96	13.74	1.13805	160	32	8.30	102	98	13.63	1.13434
133	37	8.26	96	100	13.45	1.12877	161	34	8.37	102	100	13.38	1.12661
134	30	8.18	92	92	13.08	1.11661	162	30	8.31	98	98	13.68	1.13609
135	39	8.18	96	100	15.12	1.17942	163	36	8.26	100	108	14.45	1.16000
136	25	7.96	92	94	13.06	1.11609	164	30	8.30	100	102	13.97	1.14506
137	29	8.20	98	94	13.00	1.11394	165	33	8.35	106	102	14.57	1.16350
138	27	8.27	96	98	13.16	1.11930	166	29	8.34	100	100	13.29	1.12338
139	30	8.21	98	86	13.89	1.14267	167	32	8.22	100	108	13.88	1.14223
140	28	8.22	96	96	13.07	1.11632	168	33	8.31	102	102	13.85	1.14133

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
169	36	8.24	104	100	14.23	1.15308	197	32	8.32	104	98	14.13	1.15011
170	29	8.30	100	102	13.50	1.13033	198	27	8.30	102	100	13.70	1.13658
171	29	8.24	100	104	13.90	1.14301	199	29	8.35	100	98	14.86	1.17194
172	29	8.25	102	108	13.73	1.13769	200	29	8.27	98	96	13.38	1.12629
173	30	8.30	108	106	13.38	1.12661	201	36	8.26	98	100	14.77	1.16936
174	27	8.32	102	96	13.74	1.13805	202	35	8.28	94	94	13.50	1.13033
175	28	8.36	104	110	12.64	1.10175	203	39	8.22	96	96	14.91	1.17337
176	25	8.42	100	108	13.24	1.12193	204	31	8.17	96	98	13.30	1.12399
177	31	8.41	104	104	14.36	1.15726	205	33	8.28	102	96	14.43	1.15922
178	29	8.41	100	104	13.71	1.13717	206	29	8.34	98	96	13.30	1.12399
179	34	8.39	100	106	14.85	1.17173	207	31	8.23	98	96	14.47	1.16049
180	34	8.30	98	100	13.38	1.12661	208	34	8.19	96	94	13.77	1.13902
181	33	8.33	104	100	12.81	1.10747	209	33	8.33	100	98	13.04	1.11523
182	31	8.41	100	102	13.50	1.13033	210	30	8.37	98	100	14.47	1.16049
183	31	8.18	98	102	14.28	1.15473	211	39	8.28	98	100	15.00	1.17609
184	29	8.26	102	102	13.55	1.13199	212	31	8.23	100	100	14.08	1.14851
185	29	8.12	103	104	12.22	1.08707	213	33	8.25	102	104	13.18	1.11987
186	29	8.24	102	110	12.38	1.09255	214	29	8.32	102	100	13.78	1.13918
187	32	8.26	100	100	14.14	1.15054	215	38	8.20	100	100	15.53	1.19117
188	33	8.30	102	102	13.85	1.14133	216	29	8.21	100	98	13.25	1.12222
189	34	8.34	100	96	13.25	1.12222	217	33	8.33	100	100	13.32	1.12450
190	29	8.32	100	100	13.68	1.13609	218	28	8.31	96	100	12.88	1.10975
191	33	8.34	100	98	14.50	1.16137	219	38	8.26	98	98	14.90	1.17319
192	28	8.28	100	100	13.50	1.13033	220	30	8.33	96	96	13.57	1.13243
193	31	8.26	100	108	13.00	1.11394	221	32	8.32	100	100	12.78	1.10662
194	29	8.27	98	98	13.04	1.11539	222	29	8.33	96	96	13.06	1.11590
195	32	8.33	100	98	14.35	1.15679	223	31	8.34	98	94	13.97	1.14506
196	30	8.33	98	98	13.97	1.14516	224	30	8.26	92	90	13.25	1.12222

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum	ลำดับ	Tur	pH	Alk	Har	Alum	Log Alum
225	32	8.26	96	94	13.50	1.13033	250	29	8.30	98	92	13.50	1.13033
226	28	8.27	92	92	13.30	1.12399	251	32	8.24	100	94	14.19	1.15196
227	36	8.25	94	96	14.35	1.15689	252	27	8.22	98	94	14.06	1.14806
228	30	8.09	98	94	13.26	1.12248	253	32	8.21	100	100	13.34	1.12531
229	28	8.25	98	96	13.24	1.12173	254	29	8.24	94	94	12.86	1.10914
230	32	8.33	92	86	13.39	1.12687	255	39	8.24	96	90	14.30	1.15534
231	44	8.19	86	88	14.00	1.14613	256	31	8.08	96	94	12.38	1.09255
232	50	8.20	84	90	15.00	1.17609	257	36	8.12	98	96	13.22	1.12130
233	45	8.26	98	94	14.57	1.16350	258	35	8.10	94	96	13.43	1.12823
234	37	8.32	94	94	14.25	1.15381	259	40	8.13	96	96	14.10	1.14922
235	43	8.20	92	96	14.90	1.17319	260	37	8.19	90	90	13.68	1.13609
236	34	8.29	96	96	14.11	1.14956	261	38	8.06	98	94	13.43	1.12808
237	32	8.34	100	100	14.59	1.16406	262	42	8.10	92	94	15.00	1.17609
238	31	8.36	98	96	13.83	1.14070	263	52	8.10	98	104	16.64	1.22106
239	32	8.23	100	104	14.86	1.17213	264	39	8.12	100	96	15.20	1.18184
240	32	8.32	102	98	14.25	1.15381	265	45	8.17	98	94	15.19	1.18149
241	30	8.36	104	104	13.55	1.13199	266	50	8.11	88	90	15.20	1.18184
242	29	8.36	98	98	13.56	1.13212	267	63	8.14	94	94	17.44	1.24148
243	35	8.22	106	98	14.00	1.14613	268	49	8.15	92	92	15.38	1.18682
244	32	8.22	100	100	14.23	1.15308	269	48	8.16	94	90	16.04	1.20530
245	34	8.22	102	100	13.35	1.12564	270	41	8.23	94	90	15.47	1.18959
246	31	8.20	98	104	13.59	1.13334	271	42	8.20	96	94	14.90	1.17328
247	39	8.18	100	106	14.07	1.14826	272	36	8.16	94	90	14.74	1.16847
248	33	8.20	100	98	13.33	1.12494	273	37	8.26	98	94	14.79	1.16984
249	31	8.25	104	110	13.61	1.13377	274	31	8.28	92	96	13.68	1.13597

ภาคผนวก ข

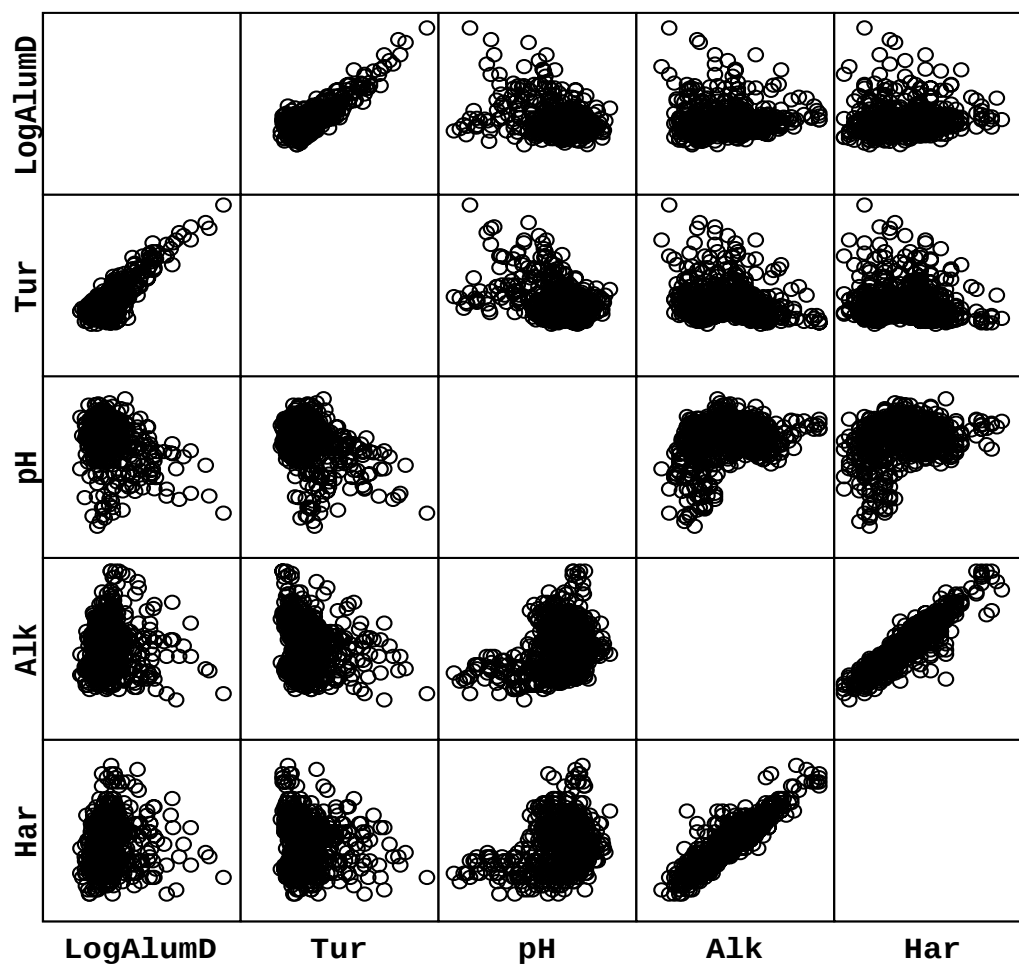
แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้สารส้มกับพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดิบ

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		AlumDose
N		730
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	14.4699
	Std. Deviation	1.80326
Most Extreme Differences	Absolute	.216
	Positive	.216
	Negative	-.144
Kolmogorov-Smirnov Z		5.845
Asymp. Sig. (2-tailed)		.000

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.



ภาพผนวกที่ ข1 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของตัวแปร

Variables Entered/Removed ^a			
Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Tur		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
2			Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
	Alk		

a. Dependent Variable: log10Alum

Model Summary ^a										
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	.825 ^a	.680	.680	.026231934	.680	1550.381	1	728	.000	1.197
2	.848 ^b	.719	.719	.024599127	.039	100.852	1	727	.000	

a. Predictors: (Constant), Tur

b. Predictors: (Constant), Tur, Alk

c. Dependent Variable: LogAlumD

ANOVA ^c						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1.067	1	1.067	1550.381	.000 ^a
	Residual	.501	728	.001		
	Total	1.568	729			
2	Regression	1.128	2	.564	931.941	.000 ^b
	Residual	.440	727	.001		
	Total	1.568	729			

a. Predictors: (Constant), Tur

b. Predictors: (Constant), Tur, Alk

c. Dependent Variable: LogAlumD

ภาพผนวกที่ ข2 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย โมเดลที่ 1 จากโปรแกรม SPSS

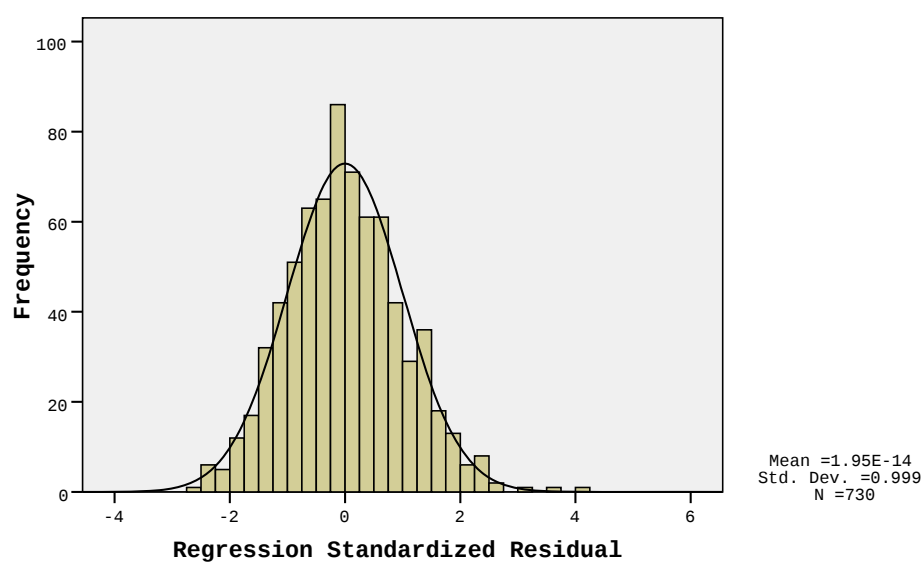
Coefficients

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	1.046	.003		347.786	.000	1.040	1.052					
	Tur	.004	.000	.825	39.375	.000	.003	.004	.825	.825	.825	1.000	1.000
2	(Constant)	.958	.009		104.137	.000	.940	.976					
	Tur	.004	.000	.857	43.062	.000	.004	.004	.825	.848	.846	.974	1.027
	Alk	.001	.000	.200	10.043	.000	.001	.001	.061	.349	.197	.974	1.027

a. Dependent Variable: LogAlumD

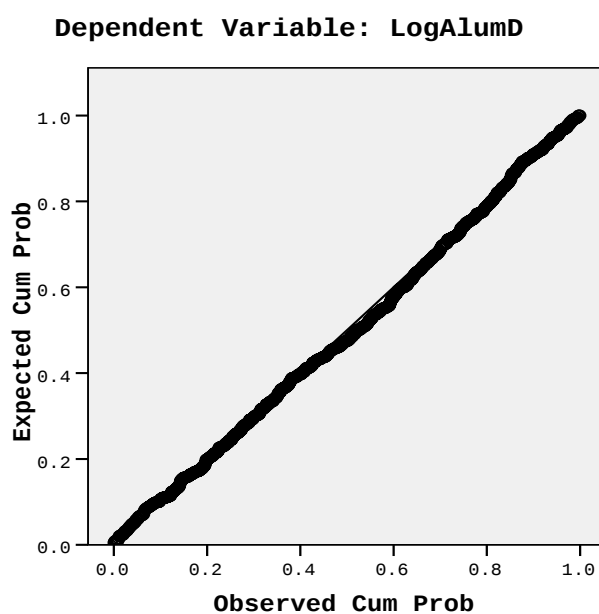
Histogram

Dependent Variable: LogAlumD

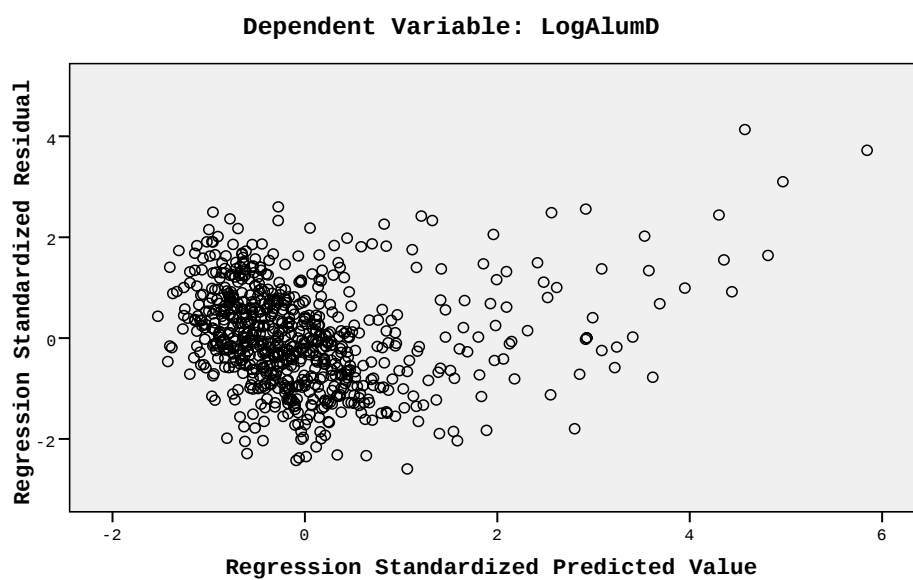


ภาพผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual



Scatterplot



ภาพผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Variables Entered/Removed ^a			
Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	TurxTur	.	Stepwise (Criteria: Probabilit y-of- F-to-enter <= .050, Probabilit y-of- F-to-remo ve >= . 100).
2	AlkxHar	.	Stepwise (Criteria: Probabilit y-of- F-to-enter <= .050, Probabilit y-of- F-to-remo ve >= . 100).
3	TurxAlk	.	Stepwise (Criteria: Probabilit y-of- F-to-enter <= .050, Probabilit y-of- F-to-remo ve >= . 100).
4	Alk	.	Stepwise (Criteria: Probabilit y-of- F-to-enter <= .050, Probabilit y-of- F-to-remo ve >= . 100).
5	AlkxAlk	.	Stepwise (Criteria: Probabilit y-of- F-to-enter <= .050, Probabilit y-of- F-to-remo ve >= . 100).
6	.	TurxAlk	Stepwise (Criteria: Probabilit y-of- F-to-enter <= .050, Probabilit y-of- F-to-remo ve >= . 100).
7	Har	.	Stepwise (Criteria: Probabilit y-of- F-to-enter <= .050, Probabilit y-of- F-to-remo ve >= . 100).

a. Dependent Variable: LogAlumD

ภาพผนวกที่ ข3 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย โมเดลที่ 2 จากโปรแกรม SPSS

Model Summary^g

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	.860 ^a	.740	.739	.023670847	.740	2070.075	1	728	.000	1.555
2	.883 ^b	.780	.780	.021761857	.041	134.325	1	727	.000	
3	.885 ^c	.783	.782	.021657144	.002	8.047	1	726	.005	
4	.885 ^d	.784	.783	.021608518	.001	4.271	1	725	.039	
5	.891 ^e	.794	.793	.021116350	.010	35.190	1	724	.000	
6	.891 ^f	.794	.793	.021101864	.000	.006	1	724	.940	
7	.892 ^g	.796	.795	.021021515	.002	6.553	1	724	.011	

- a. Predictors: (Constant), TurxTur
b. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar
c. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, TurxAlk
d. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, TurxAlk, Alk
e. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, TurxAlk, Alk, AlkxAlk
f. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, Alk, AlkxAlk
g. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, Alk, AlkxAlk, Har
h. Dependent Variable: LogAlumD

ANOVA^h

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1.160	1	1.160	2070.075	.000 ^a
	Residual	.408	728	.001		
	Total	1.568	729			
2	Regression	1.223	2	.612	1291.756	.000 ^b
	Residual	.344	727	.000		
	Total	1.568	729			
3	Regression	1.227	3	.409	872.200	.000 ^c
	Residual	.341	726	.000		
	Total	1.568	729			
4	Regression	1.229	4	.307	658.165	.000 ^d
	Residual	.339	725	.000		
	Total	1.568	729			
5	Regression	1.245	5	.249	558.401	.000 ^e
	Residual	.323	724	.000		
	Total	1.568	729			
6	Regression	1.245	4	.311	698.958	.000 ^f
	Residual	.323	725	.000		
	Total	1.568	729			
7	Regression	1.248	5	.250	564.760	.000 ^g
	Residual	.320	724	.000		
	Total	1.568	729			

- a. Predictors: (Constant), TurxTur
b. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar
c. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, TurxAlk
d. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, TurxAlk, Alk
e. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, TurxAlk, Alk, AlkxAlk
f. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, Alk, AlkxAlk
g. Predictors: (Constant), TurxTur, AlkxHar, Alk, AlkxAlk, Har
h. Dependent Variable: LogAlumD

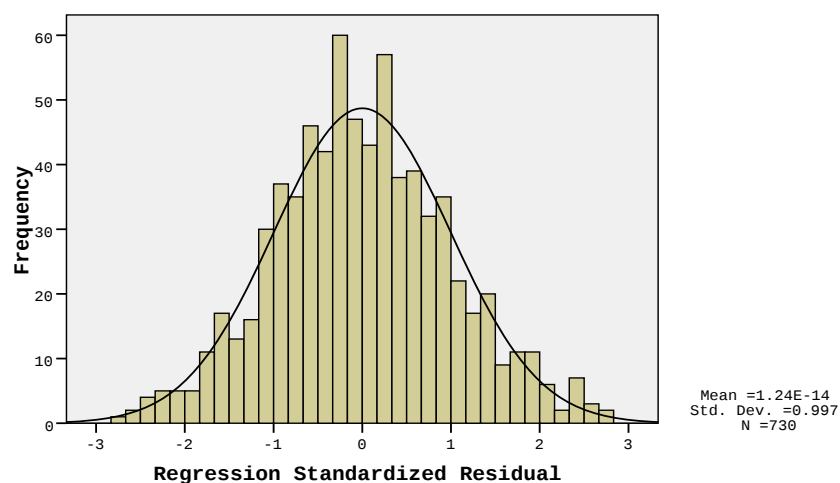
Coefficients ^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1.112	.001		832.917	.000	1.109	1.115
	TurxTur	4.11E-005	.000	.860	45.498	.000	.000	.000
2	(Constant)	1.067	.004		264.548	.000	1.059	1.075
	TurxTur	4.23E-005	.000	.884	50.519	.000	.000	.000
	AlkxHar	4.05E-006	.000	.203	11.590	.000	.000	.000
3	(Constant)	1.072	.004		247.587	.000	1.063	1.080
	TurxTur	4.94E-005	.000	1.033	18.686	.000	.000	.000
	AlkxHar	4.93E-006	.000	.247	10.586	.000	.000	.000
	TurxAlk	-6.9E-006	.000	-.158	-2.837	.005	.000	.000
4	(Constant)	1.109	.018		60.211	.000	1.073	1.145
	TurxTur	4.79E-005	.000	1.003	17.564	.000	.000	.000
	AlkxHar	8.27E-006	.000	.414	4.924	.000	.000	.000
	TurxAlk	-5.7E-006	.000	-.131	-2.299	.022	.000	.000
	Alk	-.001	.000	-.179	-2.067	.039	-.001	.000
5	(Constant)	1.413	.054		26.011	.000	1.306	1.520
	TurxTur	4.24E-005	.000	.887	15.010	.000	.000	.000
	AlkxHar	4.88E-006	.000	.244	2.810	.005	.000	.000
	TurxAlk	-1.9E-007	.000	-.004	-.075	.940	.000	.000
	Alk	-.007	.001	-1.629	-6.298	.000	-.009	-.005
	AlkxAlk	3.12E-005	.000	1.585	5.932	.000	.000	.000
6	(Constant)	1.415	.050		28.163	.000	1.316	1.513
	TurxTur	4.22E-005	.000	.883	51.463	.000	.000	.000
	AlkxHar	4.87E-006	.000	.244	2.815	.005	.000	.000
	Alk	-.007	.001	-1.637	-6.934	.000	-.009	-.005
	AlkxAlk	3.13E-005	.000	1.592	6.386	.000	.000	.000
7	(Constant)	1.372	.053		26.023	.000	1.269	1.476
	TurxTur	4.21E-005	.000	.880	51.360	.000	.000	.000
	AlkxHar	-3.4E-005	.000	-1.710	-2.226	.026	.000	.000
	Alk	-.010	.002	-2.415	-6.285	.000	-.013	-.007
	AlkxAlk	6.70E-005	.000	3.404	4.537	.000	.000	.000
	Har	.004	.002	.962	2.560	.011	.001	.007

a. Dependent Variable: LogAlumD

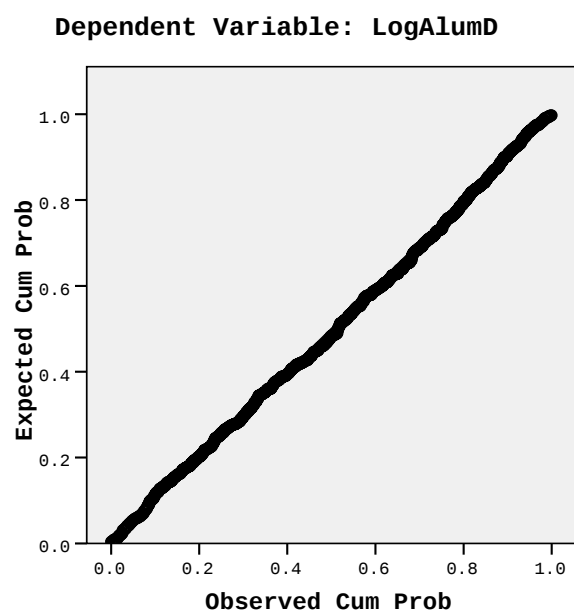
Histogram

Dependent Variable: LogAlumD

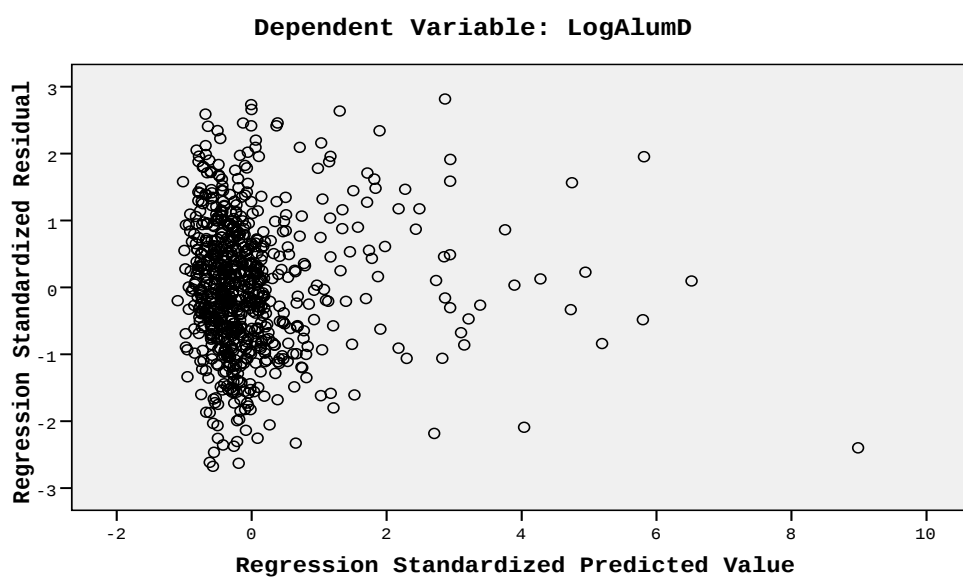


ภาพผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual



Scatterplot



ภาพผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Variables Entered/Removed ^a			
Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	TurM		Stepwise (Criteria: Probabilit y-of-F-to-enter <= .050, Probabilit y-of-F-to-remo ve >= .100).
2			Stepwise (Criteria: Probabilit y-of-F-to-enter <= .050, Probabilit y-of-F-to-remo ve >= .100).
3	HarM		Stepwise (Criteria: Probabilit y-of-F-to-enter <= .050, Probabilit y-of-F-to-remo ve >= .100).

a. Dependent Variable: LogAlumD

Model Summary ^d										
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	.861 ^a	.741	.740	.02363991212	.741	2077.403	1	728	.000	1.523
2	.887 ^b	.787	.786	.02143714326	.046	158.298	1	727	.000	
3	.889 ^c	.790	.789	.02129994095	.003	10.396	1	726	.001	

a. Predictors: (Constant), TurM

b. Predictors: (Constant), TurM, AlkM

c. Predictors: (Constant), TurM, AlkM, HarM

d. Dependent Variable: LogAlumD

ANOVA ^d					
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	Sig.
1	Regression	1.161	1	1.161	.000 ^a
	Residual	.407	728	.001	
	Total	1.568	729		
2	Regression	1.234	2	.617	.000 ^b
	Residual	.334	727	.000	
	Total	1.568	729		
3	Regression	1.238	3	.413	.000 ^c
	Residual	.329	726	.000	
	Total	1.568	729		

a. Predictors: (Constant), TurM
b. Predictors: (Constant), TurM, AlkM
c. Predictors: (Constant), TurM, AlkM, HarM
d. Dependent Variable: LogAlumD

ภาพผนวกที่ ข4 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย โมเดลที่ 3 จากโปรแกรม SPSS

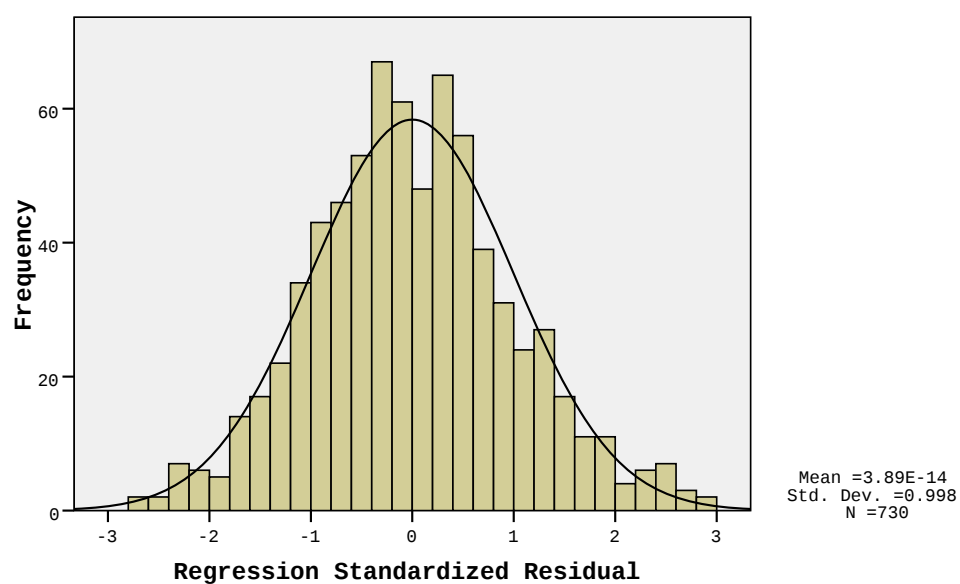
Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1.114	.001		856.767	.000	1.111	1.116
	TurM	3.16E-005	.000	.861	45.579	.000	.000	.000
2	(Constant)	1.106	.001		819.837	.000	1.103	1.108
	TurM	3.27E-005	.000	.889	51.474	.000	.000	.000
	AlkM	3.31E-023	.000	.217	12.582	.000	.000	.000
3	(Constant)	1.101	.002		582.694	.000	1.098	1.105
	TurM	3.26E-005	.000	.887	51.672	.000	.000	.000
	AlkM	1.96E-023	.000	.129	3.971	.000	.000	.000
	HarM	2.07E-014	.000	.104	3.224	.001	.000	.000

a. Dependent Variable: LogAlumD

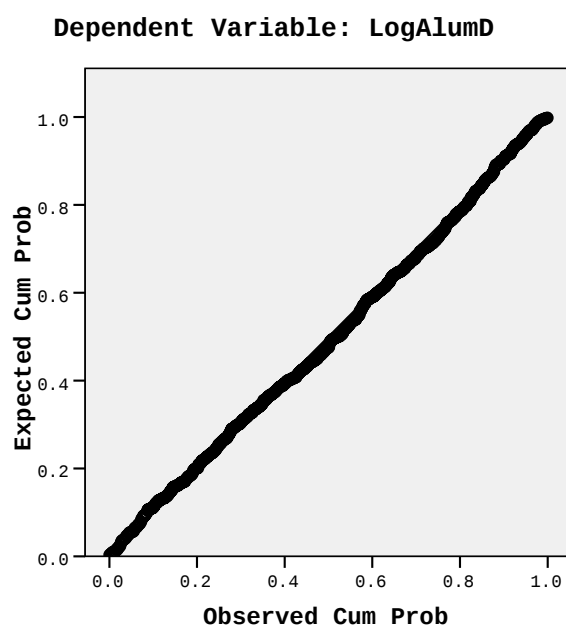
Histogram

Dependent Variable: LogAlumD

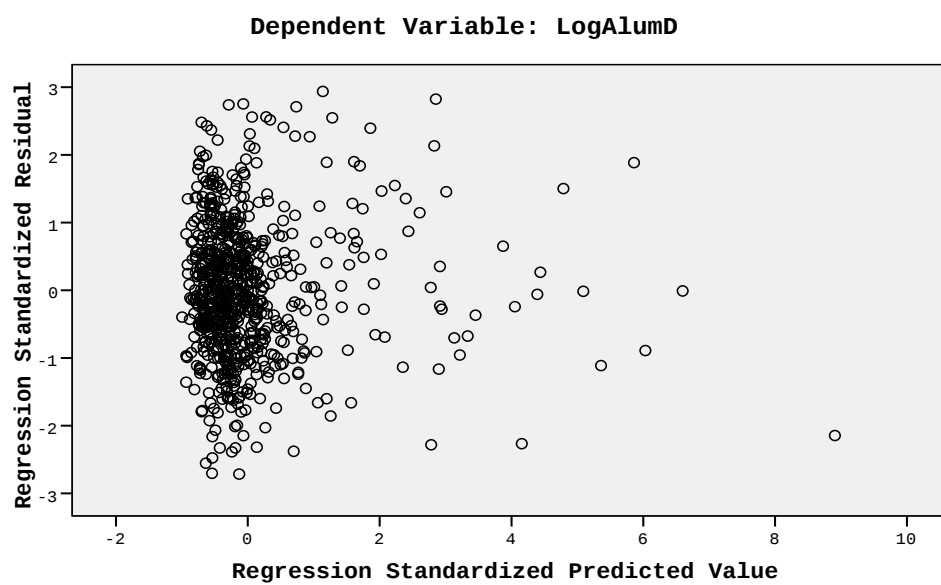


ภาพผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual



Scatterplot



ภาพผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ภาคผนวก ค

แสดงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความชุ่ม

ตารางผนวกที่ ค1 แสดงข้อมูลผลการทดลองวิธีทาภูเขา ออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ชนิดแอล 16

Obs.	A	B	C	D	E	F	G	H	T	CW
1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	5.70
2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	5.55
3	2	1	2	1	2	2	1	1	1	7.40
4	2	1	2	1	1	1	2	2	1	7.60
5	2	2	1	2	1	2	1	2	1	5.45
6	2	2	1	2	2	1	2	1	1	5.55
7	2	1	2	1	2	2	1	1	2	7.55
8	2	1	2	1	1	1	2	2	2	8.00
9	1	1	1	1	1	1	1	1	2	6.35
10	1	1	1	1	2	2	2	2	2	6.90
11	1	2	2	2	1	2	2	1	2	4.15
12	1	2	2	2	2	1	1	2	2	5.00
13	1	1	2	2	1	1	2	2	1	6.55
14	1	1	2	2	2	2	1	1	1	6.25
15	1	2	1	1	2	1	2	1	1	4.25
16	1	2	1	1	1	2	1	2	1	4.60
17	2	1	1	2	1	1	1	1	1	7.00
18	2	1	1	2	2	2	2	2	1	7.75
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6.20
20	1	1	1	1	2	2	2	2	1	6.75
21	1	1	2	2	2	2	1	1	2	6.50
22	1	1	2	2	1	1	2	2	2	6.75
23	2	2	2	1	1	2	2	1	1	5.10
24	2	2	2	1	2	1	1	2	1	5.70
25	1	2	2	2	1	2	2	1	1	4.05
26	1	2	2	2	2	1	1	2	1	4.75

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Obs.	A	B	C	D	E	F	G	H	T	CW
27	1	2	1	1	1	2	1	2	2	4.75
28	1	2	1	1	2	1	2	1	2	4.40
29	2	1	1	2	1	1	1	1	2	7.20
30	2	1	1	2	2	2	2	2	2	8.05
31	2	2	2	1	1	2	2	1	2	5.30
32	2	2	2	1	2	1	1	2	2	5.85
33	2	1	2	1	1	1	2	2	1	7.70
34	2	1	2	1	2	2	1	1	1	7.30
35	2	2	1	2	1	2	1	2	1	5.80
36	2	2	1	2	2	1	2	1	1	5.50
37	2	1	1	2	2	2	2	2	2	8.35
38	2	1	1	2	1	1	1	1	2	7.45
39	1	1	2	2	2	2	1	1	2	6.55
40	1	1	2	2	1	1	2	2	2	6.65
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6.45
42	1	1	1	1	2	2	2	2	1	6.85
43	1	1	2	2	1	1	2	2	1	6.50
44	1	1	2	2	2	2	1	1	1	6.45
45	2	1	1	2	2	2	2	2	1	8.00
46	2	1	1	2	1	1	1	1	1	7.30
47	1	2	1	1	2	1	2	1	1	4.40
48	1	2	1	1	1	2	1	2	1	4.75
49	1	1	1	1	1	1	1	1	2	6.50
50	1	1	1	1	2	2	2	2	2	7.05
51	1	2	2	2	2	1	1	2	1	4.95
52	1	2	2	2	1	2	2	1	1	4.10

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Obs.	A	B	C	D	E	F	G	H	T	CW
53	2	2	1	2	1	2	1	2	2	5.95
54	2	2	1	2	2	1	2	1	2	5.70
55	2	1	2	1	1	1	2	2	2	7.85
56	2	1	2	1	2	2	1	1	2	7.50
57	1	2	1	1	2	1	2	1	2	4.45
58	1	2	1	1	1	2	1	2	2	4.80
59	2	2	2	1	2	1	1	2	1	5.65
60	2	2	2	1	1	2	2	1	1	5.40
61	2	2	2	1	2	1	1	2	2	5.90
62	2	2	2	1	1	2	2	1	2	5.45
63	1	2	2	2	1	2	2	1	2	4.20
64	1	2	2	2	2	1	1	2	2	4.95

ตารางผนวกที่ ค2 แสดงข้อมูลแผนการทดลอง CCD แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ
25 - 40 NTU

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
1	19	26	0.25	9	360	4.75
2	20	26	0.65	9	360	6.25
3	24	26	0.45	9	600	6.05
4	23	26	0.45	9	120	4.75
5	2	29	0.35	6	240	3.50
6	55	26	0.45	9	600	6.25
7	54	26	0.45	9	120	4.65
8	5	23	0.35	12	240	6.45
9	13	23	0.35	12	480	6.45
10	57	26	0.45	9	360	5.25
11	32	23	0.35	6	240	7.00
12	34	23	0.55	6	240	7.85
13	1	23	0.35	6	240	6.85
14	7	23	0.55	12	240	6.35
15	31	26	0.45	9	360	5.35
16	27	26	0.45	9	360	5.25
17	52	26	0.45	3	360	7.25
18	53	26	0.45	15	360	5.75
19	47	29	0.55	12	480	4.50
20	45	29	0.35	12	480	4.35
21	59	26	0.45	9	360	5.15
22	60	26	0.45	9	360	5.30
23	21	26	0.45	3	360	7.45
24	22	26	0.45	15	360	5.65
25	33	29	0.35	6	240	3.60

ตารางผนวกที่ ๒ (ต่อ)

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
26	49	32	0.45	9	360	3.15
27	18	32	0.45	9	360	3.00
28	51	26	0.65	9	360	6.25
29	3	23	0.55	6	240	7.70
30	11	23	0.55	6	480	8.00
31	28	26	0.45	9	360	5.00
32	40	23	0.35	6	480	7.05
33	38	23	0.55	12	240	6.60
34	9	23	0.35	6	480	7.05
35	15	23	0.55	12	480	6.75
36	61	26	0.45	9	360	5.55
37	6	29	0.35	12	240	3.95
38	12	29	0.55	6	480	5.25
39	50	26	0.25	9	360	4.55
40	29	26	0.45	9	360	5.20
41	25	26	0.45	9	360	5.30
42	42	23	0.55	6	480	8.25
43	39	29	0.55	12	240	4.25
44	43	29	0.55	6	480	5.45
45	14	29	0.35	12	480	4.25
46	62	26	0.45	9	360	5.20
47	4	29	0.55	6	240	4.95
48	30	26	0.45	9	360	5.15
49	8	29	0.55	12	240	4.15
50	16	29	0.55	12	480	4.35
51	56	26	0.45	9	360	5.40
52	48	20	0.45	9	360	8.55

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
53	17	20	0.45	9	360	8.45
54	26	26	0.45	9	360	5.15
55	36	23	0.35	12	240	6.35
56	58	26	0.45	9	360	5.35
57	46	23	0.55	12	480	6.95
58	44	23	0.35	12	480	6.45
59	35	29	0.55	6	240	5.10
60	37	29	0.35	12	240	4.05
61	10	29	0.35	6	480	3.85
62	41	29	0.35	6	480	3.95

ตารางผนวกที่ ค3 แสดงข้อมูลแผนการทดลอง CCD แผนอัตราการผลิตต่ำ ช่วงความขุ่นน้ำดิบ
45 - 60 NTU

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
1	1	23	0.35	6	240	7.35
2	9	23	0.35	6	480	7.45
3	16	29	0.55	12	480	4.70
4	8	29	0.55	12	240	4.40
5	30	26	0.45	9	360	5.75
6	22	26	0.45	15	360	5.90
7	3	23	0.55	6	240	8.15
8	11	23	0.55	6	480	8.55
9	19	26	0.25	9	360	4.90
10	20	26	0.65	9	360	6.80
11	6	29	0.35	12	240	4.20
12	14	29	0.35	12	480	4.45
13	23	26	0.45	9	120	4.90
14	24	26	0.45	9	600	6.25
15	2	29	0.35	6	240	3.85
16	10	29	0.35	6	480	4.05
17	29	26	0.45	9	360	5.65
18	31	26	0.45	9	360	5.55
19	12	29	0.55	6	480	5.65
20	4	29	0.55	6	240	5.25
21	21	26	0.45	3	360	7.85
22	28	26	0.45	9	360	5.70
23	13	23	0.35	12	480	6.75
24	5	23	0.35	12	240	6.55
25	17	20	0.45	9	360	9.15

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
26	18	32	0.45	9	360	3.35
27	26	26	0.45	9	360	5.45
28	7	23	0.55	12	240	6.65
29	15	23	0.55	12	480	6.95
30	27	26	0.45	9	360	5.60
31	25	26	0.45	9	360	5.75

ตารางผนวกที่ ๓4 แสดงข้อมูลแผนการทดลอง CCD แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ
25 - 40 NTU

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
1	5	26	0.25	12	240	6.75
2	13	26	0.25	12	480	6.75
3	24	29	0.35	9	600	6.35
4	23	29	0.35	9	120	5.05
5	2	32	0.25	6	240	3.80
6	52	29	0.35	3	360	7.55
7	53	29	0.35	15	360	6.05
8	19	29	0.15	9	360	5.05
9	20	29	0.55	9	360	6.55
10	57	29	0.35	9	360	5.55
11	32	26	0.25	6	240	7.30
12	10	32	0.25	6	480	4.15
13	31	29	0.35	9	360	5.65
14	27	29	0.35	9	360	5.55
15	1	26	0.25	6	240	7.15
16	7	26	0.45	12	240	6.65
17	55	29	0.35	9	600	6.55
18	54	29	0.35	9	120	4.95
19	44	26	0.25	12	480	6.75
20	46	26	0.45	12	480	7.25
21	59	29	0.35	9	360	5.45
22	60	29	0.35	9	360	5.60
23	21	29	0.35	3	360	7.75
24	22	29	0.35	15	360	5.95
25	33	32	0.25	6	240	3.90

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
26	48	23	0.35	9	360	8.75
27	17	23	0.35	9	360	8.65
28	51	29	0.55	9	360	6.55
29	3	26	0.45	6	240	8.00
30	11	26	0.45	6	480	8.15
31	62	29	0.35	9	360	5.50
32	40	26	0.25	6	480	7.35
33	38	26	0.45	12	240	6.90
34	9	26	0.25	6	480	7.35
35	15	26	0.45	12	480	7.05
36	61	29	0.35	9	360	5.75
37	6	32	0.25	12	240	4.25
38	12	32	0.45	6	480	5.55
39	50	29	0.15	9	360	4.85
40	41	32	0.25	6	480	4.25
41	34	26	0.45	6	240	8.25
42	42	26	0.45	6	480	8.45
43	39	32	0.45	12	240	4.55
44	43	32	0.45	6	480	5.75
45	14	32	0.25	12	480	4.55
46	28	29	0.35	9	360	5.70
47	4	32	0.45	6	240	5.25
48	30	29	0.35	9	360	5.45
49	8	32	0.45	12	240	4.45
50	16	32	0.45	12	480	4.65
51	56	29	0.35	9	360	5.70
52	49	35	0.35	9	360	3.45

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
53	18	35	0.35	9	360	3.30
54	26	29	0.35	9	360	5.45
55	36	26	0.25	12	240	6.65
56	58	29	0.35	9	360	5.65
57	45	32	0.25	12	480	4.65
58	47	32	0.45	12	480	4.80
59	35	32	0.45	6	240	5.40
60	37	32	0.25	12	240	4.35
61	25	29	0.35	9	360	5.60
62	29	29	0.35	9	360	5.50

ตารางผนวกที่ ค5 แสดงข้อมูลแผนการทดลอง CCD แผนอัตราการผลิตสูง ช่วงความขุ่นน้ำดิบ
45 - 60 NTU

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
1	7	26	0.45	12	240	6.75
2	15	26	0.45	12	480	7.05
3	16	32	0.45	12	480	4.85
4	8	32	0.45	12	240	4.70
5	27	29	0.35	9	360	5.35
6	30	29	0.35	9	360	5.55
7	1	26	0.25	6	240	7.60
8	9	26	0.25	6	480	7.80
9	19	29	0.15	9	360	4.95
10	20	29	0.55	9	360	7.05
11	6	32	0.25	12	240	4.50
12	14	32	0.25	12	480	4.65
13	23	29	0.35	9	120	5.10
14	24	29	0.35	9	600	7.45
15	2	32	0.25	6	240	4.05
16	10	32	0.25	6	480	4.25
17	29	29	0.35	9	360	5.80
18	21	29	0.35	3	360	8.25
19	12	32	0.45	6	480	5.95
20	4	32	0.45	6	240	5.80
21	22	29	0.35	15	360	6.15
22	28	29	0.35	9	360	5.65
23	13	26	0.25	12	480	6.90
24	5	26	0.25	12	240	6.70
25	17	23	0.35	9	360	9.55

ตารางผนวกที่ ค5 (ต่อ)

RunOrder	StdOrder	Dose	Height	Flush	Drain	Ytur
26	18	35	0.35	9	360	3.55
27	26	29	0.35	9	360	5.55
28	3	26	0.45	6	240	8.45
29	11	26	0.45	6	480	8.95
30	31	29	0.35	9	360	5.60
31	25	29	0.35	9	360	5.75

ภาคผนวก ง

แสดงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เพื่อยืนยันผล

ตารางผนวกที่ ง1 แสดงข้อมูลผลการทดลองยืนยันผลครั้งที่ 1 ความขุ่นน้ำดิบ 27 - 40 NTU

ช่วง เวลา	ความขุ่น น้ำดิบ	อัตรา การผลิต	ค่าปัจจัย				จุดวัด		เฉลี่ย (CW1)
			Dose	Height	Flush	Drain	a	b	
0:00	40	3.5	24	0.40	11	400	6.5	6.4	6.45
2:00	32	3.5	24	0.40	11	400	6.0	6.0	6.00
4:00	34	3.5	24	0.40	11	400	6.2	6.1	6.15
6:00	35	5.0	27	0.25	10	320	6.4	6.3	6.35
8:00	33	5.0	27	0.25	10	320	6.1	5.9	6.00
10:00	33	3.5	24	0.40	11	400	5.9	6.0	5.95
12:00	34	3.5	24	0.40	11	400	6.0	5.9	5.95
14:00	27	3.5	24	0.40	11	400	5.7	5.8	5.75
16:00	30	3.5	24	0.40	11	400	6.1	6.0	6.05
18:00	30	5.0	27	0.25	10	320	6.1	6.2	6.15
20:00	35	5.0	27	0.25	10	320	6.3	6.1	6.20
22:00	35	3.5	24	0.40	11	400	6.2	6.0	6.10
24:00	36	3.5	24	0.40	11	400	6.0	5.9	5.95
2:00	37	3.5	24	0.40	11	400	6.3	6.2	6.25
4:00	36	3.5	24	0.40	11	400	6.2	6.0	6.10
6:00	37	5.0	27	0.25	10	320	6.2	6.5	6.35
8:00	36	5.0	27	0.25	10	320	6.2	6.0	6.10
10:00	32	3.5	24	0.40	11	400	6.0	5.8	5.90
12:00	27	3.5	24	0.40	11	400	5.8	5.7	5.75
14:00	28	3.5	24	0.40	11	400	5.9	6.0	5.95
16:00	29	3.5	24	0.40	11	400	6.1	6.2	6.15
18:00	34	5.0	27	0.25	10	320	6.3	6.3	6.30
20:00	35	5.0	27	0.25	10	320	6.1	6.3	6.20
22:00	36	3.5	24	0.40	11	400	6.1	6.0	6.05
ปริมาณน้ำดิบเฉลี่ย		347,050	ลบ.ม./วัน		สารส้มเฉลี่ย		13.955	ลบ.ม./วัน	

ตารางผนวกที่ ๒ แสดงข้อมูลผลการทดลองยืนยันผลครั้งที่ 2 ความขุ่นน้ำดิบ 36 - 49 NTU

ช่วง เวลา	ความขุ่น น้ำดิบ	อัตรา การผลิต	ค่าปัจจัย				จุดวัด		เฉลี่ย (CW2)
			Dose	Height	Flush	Drain	a	b	
0:00	40	3.5	24	0.40	11	400	6.4	6.4	6.40
2:00	38	3.5	24	0.40	11	400	6.3	6.1	6.20
4:00	38	3.5	24	0.40	11	400	6.2	6.3	6.25
6:00	40	5.0	27	0.25	10	320	6.4	6.5	6.45
8:00	46	5.0	28	0.38	11	320	5.7	5.6	5.65
10:00	39	3.5	24	0.40	11	400	6.0	5.9	5.95
12:00	41	3.5	24	0.40	11	400	6.3	6.4	6.35
14:00	42	3.5	24	0.40	11	400	6.5	6.5	6.50
16:00	36	3.5	24	0.40	11	400	5.9	5.9	5.90
18:00	41	5.0	27	0.25	10	320	6.2	6.3	6.25
20:00	39	5.0	27	0.25	10	320	6.3	6.1	6.20
22:00	49	3.5	25	0.50	12	400	5.7	5.8	5.75
24:00	48	3.5	25	0.50	12	400	5.7	5.7	5.70
2:00	42	3.5	24	0.40	11	400	6.5	6.7	6.60
4:00	39	3.5	24	0.40	11	400	6.2	6.3	6.25
6:00	41	5.0	27	0.25	10	320	6.3	6.5	6.40
8:00	40	5.0	27	0.25	10	320	6.2	6.3	6.25
10:00	36	3.5	24	0.40	11	400	5.9	5.8	5.85
12:00	38	3.5	24	0.40	11	400	6.1	6.0	6.05
14:00	36	3.5	24	0.40	11	400	5.9	6.0	5.95
16:00	40	3.5	24	0.40	11	400	6.3	6.1	6.20
18:00	37	5.0	27	0.25	10	320	6.2	6.1	6.15
20:00	39	5.0	27	0.25	10	320	6.2	6.2	6.20
22:00	42	3.5	24	0.40	11	400	6.4	6.5	6.45
ปริมาณน้ำดิบเฉลี่ย		347,800	ลบ.ม./วัน		สารส้มเฉลี่ย		13,990 ลบ.ม./วัน		

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายชัยวัฒน์ ชมสุวรรณ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2522
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การประปานครหลวง
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-