

การบำบัดสีและสารประกอบอินทรีย์ในน้ำกากส่าโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้อิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์



นายบัณฑิต เลิศประชานุรักษ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3431-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF COLOR AND ORGANIC COMPOUNDS IN DISTILLERY WASTEWATER
BY PULSE POROUS PERCOLATED ELECTRODE REACTOR

Mr. Bundit Lerdprachanuruk



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-3431-6

Copyright of Chulalongkorn University

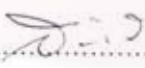
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดสีและสารประกอบอินทรีย์ในน้ำกากส่าโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์
โดย	นายบัณฑิต เลิศประชาอนุรักษ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ นุ่นสม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

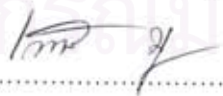

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ นุ่นสม)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พฤชาทร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี)

บัณฑิต เลิศประชาอนุรักษ์ : การบำบัดสีและสารประกอบอินทรีย์ในน้ำกากส่าโดยเครื่องปฏิกรณ์
ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์. (TREATMENT OF COLOR AND ORGANIC COMPOUNDS
IN DISTILLERY WASTEWATER BY PULSE POROUS PERCOLATED ELECTRODE
REACTOR) อ. ที่ปรึกษา: ศ.ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร. มะลิ หุ่นลม 152
หน้า. ISBN 974-14-3431-6.

น้ำทิ้งจากหมักกลั่นเรียกว่าน้ำกากส่าประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารเมลานอยดิน ซึ่ง
สารเมลานอยดินสามารถถูกกำจัดด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์หรือเครื่อง 3 พีอี
(Pulse Porous Percolated Electrode Reactor or 3PE reactor) และการตกตะกอน เครื่อง 3 พีอีนี้เป็น
การรวมกันของ 2 เทคนิค คือ เคมีไฟฟ้าและฟลูอิดไดเซชัน การวิเคราะห์เบื้องต้นของน้ำกากส่า พบว่า ซีไอดี
บีไอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลาย มีค่าเท่ากับ 109165 23738 102495 4425
และ 98070 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทั้ง 2 กระบวนการ คือกระบวนการแบบกะ
และกระบวนการแบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับกระบวนการแบบกะ คือ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด
ผลกระทบของความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต รูปแบบการทำงาน ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ และ
ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงได้ว่า ภาวะที่เหมาะสม คือ ขั้วอิเล็กโทรดเป็นแกรไฟต์ ความ
เข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตคือ 4 กรัมต่อลิตร การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเคมีไฟฟ้า
(Pretreatment process) ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10
แอมแปร์ ได้ร้อยละสูงสุดของการลดลงของสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยเป็น 98 35 54 และ 98
ตามลำดับ ในส่วนของกระบวนการต่อเนื่อง ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราการไหลและสัดส่วนของการป้อน
ย้อนกลับที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมเกิดขึ้นที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ให้
ร้อยละสูงสุดของการลดลงของสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 80 26 30 และ 98 ตามลำดับ
สัดส่วนของการป้อนย้อนกลับที่เหมาะสมคือ 9 ต่อ 1 สามารถลดสีได้ร้อยละ 88

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต..... บัณฑิตา เลิศประชาอนุรักษ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4772348023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: DISTILLERY EFFLUENT / ELECTROCHEM / OXIDIZED / FLUIDIZATION

BUNDIT LERDPRACHANURUK: TREATMENT OF COLOR AND ORGANIC COMPOUNDS IN DISTILLERY WASTEWATER BY PULSE POROUS PERCOLATED ELECTRODE REACTOR. THESIS ADVISOR: PROF.SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D., THESIS COADVISOR: ASST.PROF.MALI HUNSOM, Ph.D., 152 pp. ISBN 974-14-3431-6.

Distillery wastewater named slops is consisted of many organic compounds such as melanoidin. Melanoidin can be eliminated by pulse porous percolated electrode reactor (3PE) and precipitation process. This 3PE was the combination of two techniques which were electrochemistry and fluidization. The preliminary analysis of slops indicated that it contains COD, BOD, TS, TSS and TDS of 109165, 23738, 102495, 4425 and 98070 mg/l, respectively. This research was carried out into 2 processes; batch and continuous processes. The parameters studied in batch process were types of electrodes, effect of aluminium sulphate concentration, process configuration, sodium chloride concentration and current intensity. The results indicated that the optimum condition was obtained by using graphite as anode with pretreatment process at aluminium sulphate concentration of 4 g/l, sodium chloride concentration of 10 g/l and current intensity of 10 A. Maximum percentages of the reduction of color, COD, BOD and TSS were obtained at 98%, 35%, 54% and 98%, respectively. In case of continuous process, the studied parameters were the flow rate and the optimum recycling ratio. The results showed that the optimum condition was obtained at the flow rate of 0.5 l/hr and the maximum percentages of the reduction of color, COD, BOD and TSS were 80%, 26%, 30% and 98%, respectively. The optimum recycling ratio was found at 9:1 that can remove color about 88%.

Department: Chemical Technology	Student's Signature.....	<i>Bundit Lerdprachanuruk</i>
Field of Study: Chemical Technology	Advisor's Signature.....	<i>S. S. S.</i>
Academic Year: 2006	Co-advisor's Signature.....	<i>Mali Hongsom</i>

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดี มาโดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พุกษাত্র และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท สุราแสงโสม จำกัด จ. นครปฐม ที่กรุณาเอื้อเฟื้อน้ำกาฝากเพื่อใช้ในการทดลองโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	หน้า
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 ประเภทของโรงงานสุรา.....	4
2.2 กระบวนการผลิต.....	5
2.3 ประเภทน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา.....	7
2.4 สมบัติของน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา.....	7
2.5 น้ำกากส่าและสารเมลานอยดิน.....	9
2.6 ลักษณะและสมบัติของน้ำเสีย.....	9
2.7 วิธีการบำบัดน้ำเสีย.....	11
2.8 หลักการของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (Pulse porous percolated electrode reactor หรือ 3PE).....	18

บทที่	หน้า
2.9 หลักการตกตะกอน.....	33
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	44
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	44
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
3.3 การติดตั้งระบบ.....	46
3.4 สารเคมี.....	51
3.5 น้ำตัวอย่าง.....	52
3.6 ขั้นตอนการวิจัย.....	52
4. ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	61
4.1 ตอนที่ 1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากส่า.....	61
4.1.1 การวิเคราะห์หาค่าสมบัติของน้ำกากส่า.....	61
4.1.2 การหาความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงของน้ำกากส่าโดยเครื่อง UV spectrophotometer.....	62
4.1.3 การทดสอบการเกิดออกซิเดชันของน้ำกากส่าในเครื่องโพเทนทีโอสแตต (Potentiostat).....	63
4.2 ตอนที่ 2 ระบบปฏิบัติการแบบกะ.....	64
4.2.1 ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารตกตะกอนในถังตกตะกอน.....	64
4.2.2 ศึกษาชนิดของเม็ดข้าวไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์.....	70
4.2.3 ศึกษารูปแบบการทำงานร่วมกันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และการตกตะกอน.....	75

บทที่	หน้า
4.2.4 ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเครื่อง ปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์.....	83
4.2.5 ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมี รูพรุนแบบพัลส์.....	91
4.2.6 ศึกษาและหาสมการจลนพลศาสตร์ (Kinetic equation).....	100
4.3 ตอนที่ 3 ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง	105
4.3.1 ศึกษาอัตราการไหลที่ดีที่สุดและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ (Steady state).....	105
4.3.2 ศึกษาอัตราการไหลย้อนกลับและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ (Steady state).....	113
4.4 ตอนที่ 4 ต้นทุนการบำบัด	116
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	117
รายการอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก	125
ภาคผนวก ก ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำ.....	126
ภาคผนวก ข มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	129
ภาคผนวก ค การหาค่าสมบัติของน้ำเสีย.....	133
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ.....	147
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	152

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณภาพของน้ำเสียประเภทต่างๆ ของโรงงานต้มกลั่นสุรา 32 แห่ง ที่วราชอาณา จักร.....	8
ตารางที่ 2.2 อัตราการจมตัวของสารต่างๆ.....	33
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำกากส่าจากโรงงานสุรา.....	62
ตารางที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	76
ตารางที่ 4.3 ร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	79
ตารางที่ 4.4 ร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	79
ตารางที่ 4.5 ร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	81
ตารางที่ 4.6 ร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	82
ตารางที่ 4.7 ค่าความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	92
ตารางที่ 4.8 ร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	94
ตารางที่ 4.9 ร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	96
ตารางที่ 4.10 ร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	96
ตารางที่ 4.11 ร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	97
ตารางที่ 4.12 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส.....	101
ตารางที่ 4.13 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	102
ตารางที่ 4.14 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	103
ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ.....	103
ตารางที่ 4.16 ร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ.....	105
ตารางที่ 4.17 ร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ.....	107
ตารางที่ 4.18 ร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ.....	108
ตารางที่ 4.19 ร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ.....	109
ตารางที่ 4.20 แสดงร้อยละการลดลงของคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	113

ตาราง

หน้า

ตารางที่ ข มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	129
ตารางที่ ค (1) ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ไอดี.....	141
ตารางที่ ค (2) ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม.....	141
ตารางที่ ค (3) การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีไอดี.....	144



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงกรรมวิธีการผลิตสุราและจุดปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานสุรา.....	6
รูปที่ 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง.....	14
รูปที่ 2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ.....	15
รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ที่ชีวอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์.....	18
รูปที่ 2.5 ฟลูอิดไอเซนสามสถานะ.....	19
รูปที่ 2.6 แสดงทางเดินของการเกิดปฏิกิริยาที่ชีวอิเล็กโทรด.....	23
รูปที่ 2.7 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่	29
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	29
รูปที่ 2.8 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่....	30
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	30
รูปที่ 3.1 ถังตกตะกอน.....	46
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ชีวอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์.....	47
รูปที่ 3.3 การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ชีวอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (Pretreatment process).....	48
รูปที่ 3.4 การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังจากผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ชีวอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (Posttreatment process).....	49
รูปที่ 3.5 อัตราการไหลต่างๆ ในระบบต่อเนื่อง.....	50
รูปที่ 3.6 อัตราการป้อนย้อนกลับในระบบต่อเนื่อง.....	51
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสง.....	62
รูปที่ 4.2 กราฟ Quantitative analysis	63
รูปที่ 4.3 กราฟโพลาริเซชันของน้ำกลั่นที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ.....	63
รูปที่ 4.4 กราฟโพลาริเซชันของน้ำกลั่นที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ.....	64
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความเป็นกรด-เบสกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต.....	65

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต.....	65
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต.....	66
รูปที่ 4.8 กลไกการรวมตัวกันของสารเมลานอยดินกับสารช่วยตกตะกอน.....	66
รูปที่ 4.9 โครงสร้างของ poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes.....	67
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต..	68
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต.....	69
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลา.....	70
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลา.....	71
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลา.....	72
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของซีไอดีกับเวลา.....	74
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลา.....	74
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลา.....	75
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	76
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	78
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	78
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	81
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่การทำงานต่างๆ.....	82
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	83
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	85
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	86
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	87

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.27 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1 5 10 กรัมต่อลิตร เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	88
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	89
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆเมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	89
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์.....	91
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	92
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	93
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	94
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	95
รูปที่ 4.35 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 4,7,10 แอมแปร์ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	95
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	96
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงบีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	97
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร.....	98
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของประสิทธิภาพทางกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	98
รูปที่ 4.40 ปฏิริยาอันดับ 1 ที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส.....	100

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.41 ปฏิกริยาอันดับ 2 ที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส.....	100
รูปที่ 4.42 ปฏิกริยาอันดับ 3 ที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส.....	101
รูปที่ 4.43 ปฏิกริยาอันดับ 4 ที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส.....	101
รูปที่ 4.44 ปฏิกริยาอันดับ 1 ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	101
รูปที่ 4.45 ปฏิกริยาอันดับ 2 ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	101
รูปที่ 4.46 ปฏิกริยาอันดับ 3 ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	102
รูปที่ 4.47 ปฏิกริยาอันดับ 4 ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	102
รูปที่ 4.48 ปฏิกริยาอันดับ 1 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	102
รูปที่ 4.49 ปฏิกริยาอันดับ 2 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	102
รูปที่ 4.50 ปฏิกริยาอันดับ 3 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	103
รูปที่ 4.51 ปฏิกริยาอันดับ 4 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	103
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างล็กกาไลทีมฐานอิสระของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกริยากับส่วน กลับของอุณหภูมิ.....	104
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ.....	106
รูปที่ 4.54 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5,1.0,1.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	106
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ.....	107
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ.....	108
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหล ต่างๆ.....	109
รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	110
รูปที่ 4.59 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	110
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตร ต่อชั่วโมง.....	111
รูปที่ 4.61 แสดงความสัมพันธ์ร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	112

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	112
รูปที่ 4.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลป้อนกลับร้อยละ 90 และอัตราการไหลเข้ากับออกร้อยละ 10.....	114
รูปที่ 4.64 แสดงลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลป้อนกลับร้อยละ 90 และอัตราการไหลเข้ากับออกร้อยละ 10.....	115

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีรายได้มาจากแหล่งธุรกิจต่างๆ มากมายแตกต่างกันไป โดยเฉพาะธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับหมวดเครื่องดื่ม กล่าวคือ เครื่องดื่มประเภทที่มีแอลกอฮอล์ เช่น สุรา จัดเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าจับตามองและกำลังเป็นที่สนใจ เหตุที่ได้รับความสนใจเพราะในแต่ละปีนั้น อุตสาหกรรมนี้ทำรายได้มากมายมหาศาล โดยเมื่อพิจารณาจากข้อมูลของกรมสรรพสามิตและกรมศุลกากร ซึ่งเก็บภาษีของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ได้ปีละหลายหมื่นล้านบาท จากยอดบริโภคเฉลี่ยกว่าแสนล้านบาท ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผู้ประกอบการพยายามที่จะขยายธุรกิจด้วยการเพิ่มกำลังการผลิตให้สูงขึ้นตั้งแต่ช่วงปี 2543 เป็นต้นมา โดยมียอดการผลิตจากภาคอุตสาหกรรมสุรามากกว่า 105 ล้านลิตร และในปี 2547 มียอดการผลิตกว่า 650 ล้านลิตร การที่ปริมาณการผลิตเพิ่มมากขึ้นก็เพื่อรองรับความต้องการที่มีมากขึ้นในช่วงเวลาเดียวกัน

ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ มีปริมาณน้ำกากส่ามากขึ้นซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย กล่าวคือส่วนที่เป็นข้อดีของน้ำกากส่า เช่น สามารถนำไปใช้รดกองปุ๋ยหมักสำหรับโรงงานผลิตปุ๋ยอินทรีย์ และยังสามารถนำกากที่แยกออกจากน้ำกากส่าไปทำเป็นอาหารสัตว์ นอกจากนี้นำไปหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ (Bio gas) ดังเช่น โครงการสวนพระองค์ สวนจิตรลดา (คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร, 2545) เป็นต้น เหตุที่น้ำกากส่านำไปใช้ประโยชน์ได้เพราะมีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์ แต่การใช้งานยังคงต้องมีการผสมน้ำด้วยอัตราส่วนที่พอเหมาะ ส่วนที่เป็นข้อเสีย คือเนื่องจากปริมาณการผลิตที่สูง ทำให้น้ำเสียจากระบบการผลิตในส่วนต่างๆ ย่อมเกิดขึ้นมากด้วย เช่น น้ำกากส่าที่ออกจากหอกถัน น้ำล้าง และน้ำหล่อเย็น เป็นต้น น้ำกากส่าเป็นน้ำที่มีความสกปรกสูงเพราะประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิดโดยเฉพาะสารที่เรียกว่า สารเมลาโนยดิน ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดสี และทำให้น้ำกากส่ามีสีน้ำตาลเข้ม ในการศึกษาวิจัยเพื่อบำบัดน้ำกากส่าให้สิ่งสกปรกลดน้อยลงจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เมื่อพิจารณาข้อมูลของน้ำกากส่าแล้วแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศนี้ได้ ด้วยเหตุที่ก่อให้เกิดทั้งข้อดีและข้อเสีย ทางออกที่ถูกต้องเพื่อให้เกิดกิจกรรมทางธุรกิจได้อย่างคุ้มค่าจำเป็นต้องใช้ระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพก่อนที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อการลดสีของน้ำกากส่า เช่น การบำบัดทางชีวภาพ การบำบัดทางเคมีกายภาพ การบำบัดทางเคมีไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งให้ผลที่ดีในระดับหนึ่ง งานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการแบบผสมผสานระหว่าง ทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า ฟลูอิดเซชัน และวิธีทาง

เคมีกายภาพ มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสุรา ซึ่งเทคนิคนี้ถูกใช้โดยผ่านทางเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้มีการพัฒนาขึ้นร่วมกับถังตกตะกอน (Precipitated tank) ทำให้น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดลงของสีและสารประกอบอินทรีย์โดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์
2. หามภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดลงของสีและสารประกอบอินทรีย์โดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ในกระบวนการแบบกะและต่อเนื่องควบคู่กับเทคนิคการตกตะกอน
2. หามภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดลงของสีและสารอินทรีย์โดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ในกระบวนการแบบกะและต่อเนื่องควบคู่กับเทคนิคการตกตะกอน

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการกำจัดสีและสารประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เทคนิคทางชีวภาพ เทคนิคทางเคมีกายภาพ และเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน เป็นต้น
2. ศึกษาวิธีใช้งานในส่วนของตัวเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง เช่น สารทดสอบสี สารทดสอบซีโอดี และสารทดสอบบีโอดี เป็นต้น
3. เก็บน้ำเสียและทดสอบสมบัติของน้ำเสียเบื้องต้น ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส ซีโอดี บีโอดี การนำไฟฟ้า ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และสี เป็นต้น
4. จัดหาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย เช่น เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ไซพัคทอน มอเตอร์ และขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น และติดตั้งเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดลองทั้ง 2 กระบวนการ
 - 4.1 แบบกะ
 - 4.2 แบบต่อเนื่อง
5. ออกแบบการทดลองและทำการทดลอง

5.1 ศึกษาตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการแบบกะ

- ความเข้มของกระแสไฟฟ้าในช่วงระหว่าง 1 – 10 แอมแปร์
- ความเข้มข้นของสารตัวเติม (Supporting electrolyte) ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ ในช่วงระหว่าง 1– 10 กรัมต่อลิตร
- ความเข้มข้นของสารก่อการจับก้อน (Coagulant) ได้แก่ อะลูมิเนียมซัลเฟต ในช่วงระหว่าง 1 – 10 กรัมต่อลิตร

5.2 ศึกษาตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการแบบต่อเนื่อง เช่น อัตราการไหล เป็นต้น

6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้อิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ ซึ่งจะเป็พื้นฐานในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป
2. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและการขยายขนาดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงกับโรงงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ปัจจุบันประเทศไทยมีภาวะการเติบโตและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องมาตลอด ทำให้เกิดการกระจายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมขึ้นภายในประเทศ รายได้ของประเทศมาจากภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ เครื่องดื่ม เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น ในส่วนของอุตสาหกรรมเครื่องดื่มเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศมากมายมหาศาล โดยเฉพาะเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ในที่นี้คือ สุรา ทำรายได้ในแต่ละปีนับหลายหมื่นล้านบาท ซึ่งพิจารณาจากข้อมูลของผลผลิตทางภาคอุตสาหกรรม กำลังการผลิต และปริมาณการจำหน่ายสินค้า ทำให้อุตสาหกรรมนี้เป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก

ที่ผ่านมามีน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น น้ำเสียจากโรงงานผลิตสุรา โรงงานชุบโลหะ โรงงานฟอกหนัง โรงงานย้อมผ้า เป็นต้น โดยเฉพาะน้ำเสียจากโรงงานผลิตสุรา ด้วยกำลังการผลิตที่สูงกว่าหลักร้อยล้านลิตรต่อปี ย่อมก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเป็นปริมาณมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมดังนั้นจำเป็นต้องมีการบำบัดที่ดียกก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

2.1 ประเภทของโรงงานสุรา (กิตติ, 2524)

สุราเป็นเครื่องดื่มที่ได้จากการผสมแอลกอฮอล์ (Alcohol) น้ำ และส่วนผสมอื่นๆ เพื่อให้มีรสชาติและสีแตกต่างกันไป หากถือวัตถุดิบเป็นเกณฑ์ โรงงานสุราอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.1.1 โรงงานสุราที่ผลิตจากเมล็ดธัญพืช (Grain distilleries) ได้แก่ โรงงานผลิตสุราประเภทสุราเกาเหลียง สก็อตวิสกี้ (Scotch whiskey) ผลิตจากเมล็ดธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าวเหนียว ข้าวสาลี ข้าวเจ้า และข้าวบาเลย์ เป็นต้น

2.1.2 โรงงานสุราที่ผลิตจากผลไม้ (Fruit distilleries) ได้แก่ โรงงานผลิตสุราประเภทไวน์ บรั่นดี แชมเปญ โดยใช้อุ่นเป็นวัตถุดิบ

2.1.3. โรงงานสุราที่ผลิตจากกากน้ำตาล (Molasses distilleries) โรงงานที่ผลิตสุราเกือบทุกโรงงานในประเทศไทย ใช้วัตถุดิบนี้ในการผลิต โดยใช้กากน้ำตาลผสมกับข้าวเหนียว ซึ่งอัตราส่วนระหว่างกากน้ำตาลและข้าวเหนียวที่ใช้ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ของแต่ละโรงงาน เช่น สุราขาว สุราผสม รัม (Rum) เป็นต้น

โรงงานทั้ง 3 ประเภทนี้ จะมีกรรมวิธีขั้นพื้นฐานในการผลิตเหมือนกัน ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบเท่านั้น

2.2 กระบวนการผลิต (มาลี, 2531)

กระบวนการผลิตสุรจากากน้ำตาลแบ่งได้ 4 ขั้นตอน (ดังรูปที่ 2.1) ได้แก่

2.2.1 การหมักกาน้ำตาล (Fermentation)

กาน้ำตาล (Molasses) เป็นผลิตภัณฑ์เหลือจากการผลิตน้ำตาลทราย ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถถดถอยได้อีก มีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อัตราความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมในการหมักประมาณร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการหมักจึงต้องเจือจางกาน้ำตาลด้วยน้ำ 3 เท่า แล้วจึงใส่เชื้อหมัก (Yeast) และอาหารเสริม การหมักใช้เวลา 48 ชั่วโมง จะได้แอลกอฮอล์ร้อยละ 8-10 โดยปริมาตร ส่วนผสมของแอลกอฮอล์ภายหลังกการหมักนี้เรียกว่า เบียร์ (Beer) หรือ แมช (Mash) หรือน้ำสา ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหอกลั่น

2.2.2 การกลั่นแอลกอฮอล์ (Distillation)

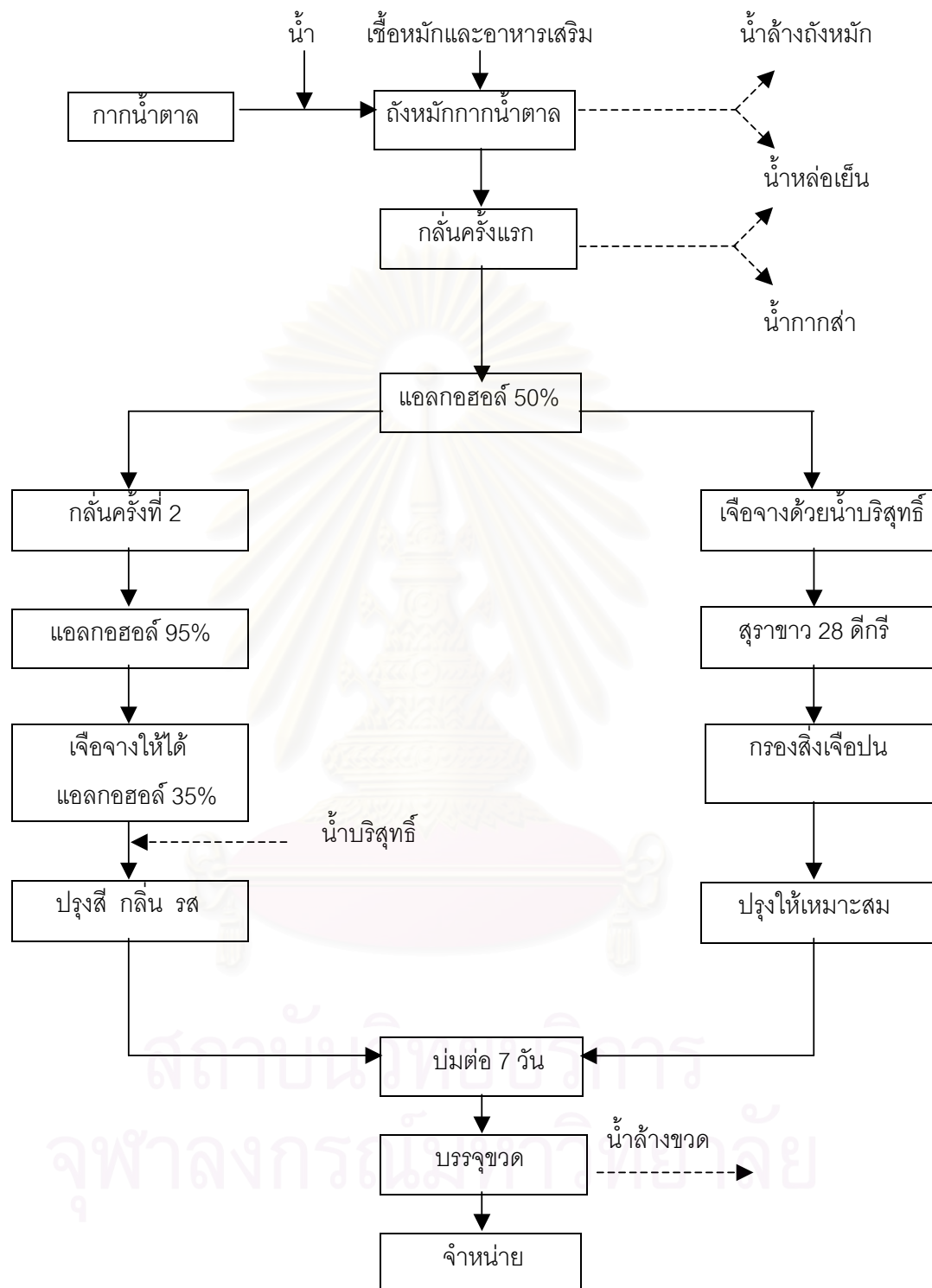
น้ำสาถูกส่งมายังหอกลั่นแรก เพื่อกลั่นแยกแอลกอฮอล์ออกมา ได้แอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 50 ส่วนหนึ่งของที่กลั่นได้นี้ถูกนำไปผลิตเป็นสุรขาว และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปกลั่นในขั้นตอนต่อไป เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร

2.2.3 การผลิตสุรขาว (Raw alcohol production)

ส่วนหนึ่งของแอลกอฮอล์ร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งแรก จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์เพื่อให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 28 โดยปริมาตร หรือ 28 ดีกรี เรียกว่า สุรขาว จากนั้นกรองเศษผงและสิ่งเจือปนออก ปิ้งให้เหมาะสมและนำมาบ่มต่อประมาณ 7 วัน แล้วนำไปบรรจุขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

2.2.4 การผลิตสุรผสม (Blended liquor production)

นำแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งที่สอง มาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร หรือ 35 ดีกรี แล้วเติมสี ยาสมุนไพร และส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อให้ได้กลิ่นหอมและรสชาติตามความต้องการ จากนั้นจึงนำมารองและบ่มต่อประมาณ 7 วัน ก่อนบรรจุลงขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงกรรมวิธีการผลิตสุราและจุดปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานสุรา (มาลี, 2531)

2.3 ประเภทน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา (มาลี, 2531)

น้ำทิ้งจากโรงงานสุราแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 น้ำทิ้งประเภทเข้มข้น

น้ำทิ้งส่วนนี้มีค่าบีโอดี สูงประมาณ 2500-35000 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้แก่ น้ำล้างถังหมัก และน้ำกากส่า ปริมาณน้ำทิ้งทั้งสองขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตของแต่ละโรงงาน เนื่องจากน้ำล้างถังหมักมีปริมาณน้อยประมาณ 5-10 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนน้ำกากส่ามีประมาณ 300-450 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำทิ้งทั้งสองจึงนำมาบำบัดรวมกัน แม้ว่าค่าบีโอดี จะแตกต่างกันประมาณ 14 เท่า

2.3.2 น้ำทิ้งประเภทเจือจาง

เป็นน้ำทิ้งที่มีค่าบีโอดีต่ำ ประมาณ 10-450 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้แก่ น้ำล้างขวดน้ำหล่อเย็น และน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือน เป็นต้น น้ำทิ้งส่วนนี้ไม่นำมาบำบัดรวมกับน้ำกากส่า เนื่องจากมีค่าบีโอดีแตกต่างกันมากและมีปริมาณสูงการแยกบำบัดจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า

2.4 สมบัติของน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา (กัณฑมาศ, 2539)

น้ำทิ้งของโรงงานสุราส่วนใหญ่มาจากกระบวนการผลิตสุราในแต่ละขั้นตอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 สำหรับลักษณะของน้ำทิ้งประเภทต่างๆ จากโรงงานสุรา มีลักษณะแตกต่างกันไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

จากตารางแบ่งประเภทของน้ำเสียจากโรงงานต้มกลั่นสุราได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ดังนี้

- น้ำกากส่าชนิดส่าแดง (Stillage)
- น้ำล้างขวด (Bottle washing waste)
- น้ำหล่อเย็นคอนเดนเซอร์ (Cooling water for stillage)

น้ำกากส่าจัดเป็นน้ำที่มีความสกปรกสูงกว่าน้ำล้างขวดและน้ำหล่อเย็นคอนเดนเซอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยมีค่าวิเคราะห์สมบัติทางน้ำที่เกินมาตรฐาน ได้แก่ ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด ของแข็งละลาย ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม และซัลเฟต เป็นต้น ดังนั้นจึงถูกนำมาบำบัดด้วยกระบวนการต่างๆ ที่เหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยรวม โดยปกติแล้วน้ำทิ้งจากโรงงานสุราที่อัตราการผลิต 4500 เทต่อวัน (1 เท เท่ากับ 20 ลิตร) จะมีปริมาณน้ำกากส่าประมาณ 300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือมีปริมาณน้ำกากส่าประมาณ 3.5 เท่า ของอัตราการผลิต

ตารางที่ 2.1 สมบัติของน้ำเสียประเภทต่างๆ ของโรงงานต้มกลั่นสุรา 32 แห่ง ที่วราชอาณาจักร (มาลี,2531)

ประเภทน้ำเสีย	ค่า	ปริมาณน้ำทิ้ง (ลบ.ม.ต่อวัน)	pH	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	BOD5 (กรัมต่อลบ.ม)	COD (กรัมต่อลบ.ม)	COD/BOD	SS (กรัมต่อลบ.ม)	TS (กรัมต่อลบ.ม)	TVS (กรัมต่อลบ.ม)	Total N (กรัมต่อลบ.ม)	P (กรัมต่อลบ.ม)	K (กรัมต่อลบ.ม)	SO4 (กรัมต่อลบ.ม)	Alkalinity (กรัมต่อลบ.ม)	Hardness (กรัมต่อลบ.ม)
น้ำกากส่าแดง (Stillage)	เฉลี่ย	90	3.7	88.6**	27475	118100	4.3	11319	75830	58520	940	115	4760	3720	-	-
	พิสัย	23-400	2.3-5.5	53-100	17500-45000	56970-193600	1.90-7.67	5240-23830	36850-123640	30280-59220	40-2160	24-380	2300-8900	1820-5160	-	-
น้ำล้างขวด (Bottle washing waste)	เฉลี่ย	90	7.2	29.5	100	220	2.2	107.3	308.5	143.8	3.2	0.16	-	-	-	-
	พิสัย	4.0-720	4.5-12.2	24-38.5	10-450	36-96	-	7-658	96-1414	36-394	0.7-10.5	0.08-0.25	-	-	-	-
น้ำหล่อเย็นคอนเดนเซอร์ (Cooling water for stillage)	เฉลี่ย	812	6.8	42.8	27	54.2	2.0	72.4	277.8	96.4	347	7	-	-	77	57
	พิสัย	16-4560	4.3-8.5	29-59	11-42	8-159	1-4	0.5-819	34-982	22-718	0.33-3000	-	-	-	5.6-130	6.6-134

หมายเหตุ สํารวจโดย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (สวท.)

** สำหรับโรงงานแห่งใหม่ อุณหภูมิจะลดลงเป็น 40 องศาเซลเซียส เพราะจะต้องผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

2.5 น้ำกากสำและสารเมลานอยดิน

น้ำกากสำ (Slop) เป็นน้ำทิ้งที่ออกจากหอกลั่นประเภท Mash column โดยทั่วไปน้ำกากสำแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.5.1 กากสำขาว ได้จากการใช้ข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบในการผลิต

2.5.2 กากสำแดง ได้จากกระบวนการผลิตที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

น้ำกากสำจากโรงงานสุราเกือบทุกแห่งในประเทศไทยเป็นชนิดกากสำแดง ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูง นอกจากนี้ยังมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเกิดจากสารคาราเมล (Caramel) ในกากน้ำสำ

คาราเมล เป็นสารประกอบที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากน้ำตาลได้รับความร้อนมากเกินไป ในระหว่างการผลิตน้ำตาลทราย คาราเมลมีสีดำสนิท ส่วนมากใช้ประโยชน์ในการทำเป็นส่วนผสมที่ทำให้เกิดสีในอาหาร เช่น ซีอิ๊ว ซอสปรุงรส สุรา และเครื่องดื่มประเภทน้ำอัดลมต่างๆ เป็นต้น สารคาราเมลนี้เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ดังนั้นสารคาราเมลจึงมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอนโดยทั่วไปเรียกสารประกอบพวกนี้ว่า Brown melanoidin

เมลานอยดิน (Melanoidin) เป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 5000 ถึง 40000 (Migo et al., 1993) และเกิดจากปฏิกิริยาของการเกิดสีน้ำตาล (Browning or maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation) ของน้ำตาลชนิดต่างๆ กับสารประกอบไนโตรเจน เช่น กรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดอะมิโน (Amino acid) โดยไม่ใช้เอนไซม์เข้าร่วม นอกจากนี้สารเมลานอยดินมีประจุลบ โดยประจุลบมาจากการแยกของกรดคาร์บอกซิลิกและกลุ่มสารฟีนอลิก และเป็นคอลลอยด์อยู่ในน้ำกากสำที่มีภาวะของความเป็นกรด (Kato and Hayase, 2002; Manisankar et al., 2004)

2.6 ลักษณะและสมบัติของน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์, 2539; กัณท์มาศ, 2539)

มลสาร หมายถึง สารที่ก่อให้เกิดมลภาวะอันได้แก่ พิษที่เกิดจากความมัวหมองหรือความสกปรก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

โดยทั่วไปน้ำแหล่งใดจัดเป็นน้ำเสียสามารถพิจารณาได้จาก 3 ลักษณะ คือ ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมี และลักษณะทางชีวภาพ

2.6.1 ลักษณะทางกายภาพ (Physicals characteristics) ปัจจัยที่มีความสำคัญและแสดงถึงน้ำเสียทางกายภาพ ได้แก่ ของแข็งต่าง ๆ กลิ่น อุณหภูมิ สี และความขุ่น เป็นต้น

- **กลิ่น** เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสียของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่ ไข่เน่า ผักกะหล่ำปลีเน่า กลิ่นของปลาตาย กลิ่นอับ เป็นต้น การกำจัดกลิ่นอาจใช้สารเคมีที่มีความสามารถออกซิไดส์สารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้ เช่น คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ คาร์บอน ฯลฯ

- **อุณหภูมิ** น้ำที่ปล่อยออกมาจากโรงงานปกติแล้วมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ ทำให้เกิดความเสียหายต่อสภาพแวดล้อม เช่น ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยลงซึ่งอาจทำให้น้ำเกิดการเน่าเสียได้ รวมทั้งพืชกับบางชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ ฯลฯ

- **สี** อาจเกิดขึ้นมาจากน้ำทิ้งของโรงงานต่างๆ ได้แก่ โรงงานกระดาษ โรงงานสุราน้ำ เป็นต้น สีก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ขวางกั้นทางเดินของแสงทำให้ลดการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชน้ำ ฯลฯ

- **ความขุ่น** เกิดจากสารแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งขวางกั้นทางเดินของแสงเช่นเดียวกับสี น้ำที่มีความขุ่นมากทำให้ยากต่อการกรองและต้นทุนสูงขึ้นเนื่องจากต้องใส่สารเคมีเพิ่มขึ้น

2.6.2. ลักษณะทางเคมี (Chemicals characteristics) สามารถพิจารณาได้จากสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์

- **สารอินทรีย์** ได้แก่ โปรตีน น้ำมัน ผงซักฟอกสังเคราะห์ ฟีนอล กรดคาร์บอกซิลิก สีทา สี ย้อม คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล เป็นต้น

- **สารอนินทรีย์** ได้แก่ กรด เบส คลอไรด์ ไนเตรต ฟอสเฟต ซัลเฟต ไบคาร์บอนเนต เกลือของโลหะ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโลหะหนัก เป็นต้น

2.6.3. ลักษณะทางชีวภาพ (Biological characteristics) จุลินทรีย์หลายชนิดมีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากจุลินทรีย์ทำหน้าที่เป็นตัวย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำเสีย และขณะเดียวกันมีจุลินทรีย์ไม่น้อยที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ จุลินทรีย์ประกอบไปด้วย 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- **สัตว์** เช่น โรติเฟออร์ (Rotifers) ครัสเตเชียน (Crustaceans) วอร์ม (Worms) ฯลฯ

- **พืช** เช่น มอส (Mosses) เฟิร์น (Ferns) ลิเวอร์เวิร์ท (Liverworts) ฯลฯ

- **โปรติสตา** เช่น แบคทีเรีย (Bacteria) สาหร่าย (Algae) เห็ด (Fungi) โปรโตซัว (Protozoa) ฯลฯ

2.7 วิธีการบำบัดน้ำเสีย (กรรณิการ์, 2544)

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การดำเนินการเปลี่ยนแปลงสภาพของเสียในน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมพอที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อแหล่งรับน้ำเสียนั้นๆ ในการเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียควรพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- ความต้องการในการกำจัดสารต่างๆ
- ประสิทธิภาพของระบบ
- ขนาดพื้นที่ในการก่อสร้าง
- ต้นทุนในการดำเนินงาน

ซึ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี และการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยทั่วไปการจัดการน้ำเสียเหล่านี้ส่วนใหญ่มักต้องการวิธีการจัดการมากกว่าหนึ่งอย่าง เพื่อมุ่งหวังให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลที่ดี

2.7.1 วิธีบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment method) (เพ็ญศรี, 2542; มั่นสิน, 2543)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพเป็นการใช้หลักการทางกายภาพ เช่น แรงโน้มถ่วง แรงเหวี่ยง แรงหนีศูนย์กลาง เป็นต้น เพื่อกำจัดเอาสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสีย โดยเฉพาะสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ จึงนับเป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียขั้นแรกที่ถูกนำมาใช้ก่อนที่น้ำเสียจะถูกนำไปบำบัดขั้นต่อไป จนกว่าน้ำเสียที่ทำการบำบัดนั้นจะมีคุณภาพดีพอที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่ การกรองด้วยตะแกรง การทำให้ลอย การตัดย่อย รวงดักกรวดทราย การปรับสภาพการไหล การแยกด้วยแรงเหวี่ยง การตกตะกอน และการกรอง เป็นต้น

1) การกรองด้วยตะแกรง (Screening) ใช้เพื่อสำหรับดักสิ่งของที่ลอยน้ำ เช่น เศษอาหาร เศษไม้ เศษกระดาษ เศษผ้า พลาสติก ฯลฯ ที่ไหลมากับน้ำเสีย ตะแกรงมี 2 ประเภท คือ ตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด โดยตะแกรงละเอียดมีขนาดตาเล็กกว่าตะแกรงหยาบ ซึ่งตะแกรงทั้งสองนี้ช่วยป้องกันมิให้เครื่องสูบน้ำอุดตัน

2) การทำให้ลอย (Flotation) เป็นการแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยากหรือของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับของเหลวออกจากของเหลว โดยใช้ฟองอากาศเป็นตัวพาเพื่อแยกเอาสิ่งสกปรกให้ลอยสูงขึ้นสู่ผิวของของเหลวกลายเป็นฟอง ซึ่งสามารถกำจัดด้วยการกวาดออกหรือตักออกโดยใช้คนและเครื่องมือกล

3) การตัดย่อย (Comminution) เป็นวิธีการทำให้ของแข็งมีขนาดเล็กกลงและสม่ำเสมอ โดยการบดตัดของแข็งที่ปะปนมากับน้ำเสีย เช่น เศษเนื้อ กระดูกหมู กระดูกไก่ เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดขั้นต่อไป

4) รางดักกรวดทราย (Grit chamber) รางดักกรวดทรายเป็นเครื่องมือที่ใช้แยกของแข็งที่มีน้ำหนักมากออกจากน้ำเสีย ในที่นี้คือกรวดทราย ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เครื่องสูบน้ำลึกกร่อนและเสียหาย เนื่องจากถูกขัดสี

5) การปรับสภาพการไหล (Flow equalization) การปรับสภาพการไหลเป็นวิธีการเก็บกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่งเพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเสียซึ่งไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ทำให้ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำเสียมีค่าคงที่

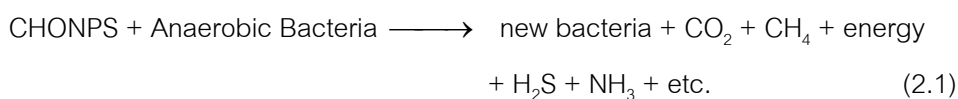
6) การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นการแยกของแข็งหรือตะกอนแขวนลอยที่รอดผ่านตะแกรงมาได้ออกจากน้ำเสีย ปกติแล้วถึงตกตะกอนจะมีขนาดใหญ่ใช้สำหรับเป็นที่พักน้ำเสีย เมื่อน้ำเสียไหลเข้ามาในถังตกตะกอนมันจะใช้เวลาอยู่ในถัง 2-4 ชั่วโมง จากนั้นตะกอนจะถูกอิทธิพลของแรงดึงดูดของโลก ทำให้ตกลงสู่ก้นถัง

7) การกำจัดน้ำมันและไขมัน (Oil and grease removal) พบมากในน้ำทิ้งจากร้านอาหาร สถานีจำหน่ายน้ำมัน และโรงงานทอผ้า น้ำมันและไขมันสามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น การเติมคลอรีน การเพิ่มอุณหภูมิ และการเป่าอากาศ เป็นต้น

2.7.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process)

2.7.2.1 การบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic treatment process) (Ahn et al., 1996; Vijayaraghvan and Murthy, 1997; Wiemann et al., 1998)

การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้รับความนิยมและแพร่หลาย ในทางปฏิบัติมักเริ่มต้นจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศก่อนแล้วตามด้วยระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน เพราะทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดได้มาก ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สมีเทน (CH₄) โดยมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และอื่นๆ ปะปนมาด้วย นอกจากนี้อาจมีสารประกอบอินทรีย์บางชนิดเกิดขึ้นมาด้วย เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น ดังปฏิกิริยารวม

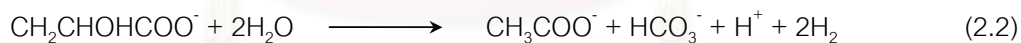


ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ (อานนท์, 2538; เพ็ชรพร, 2538)

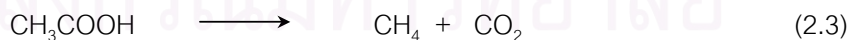
1) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กระบวนการนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า กระบวนการแตกสลายพอลิเมอร์ (Polymer break-down) ในขั้นแรกนี้สารอินทรีย์ประเภทซับซ้อนที่มีโมเลกุลใหญ่ ไม่สามารถละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน เป็นต้น จะถูกย่อยโดยน้ำย่อยที่ปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย (External enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งผลของปฏิกิริยาทำให้ได้สารอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อน กล่าวคือมีโมเลกุลขนาดเล็กและสามารถละลายน้ำได้ ในขั้นตอนนี้ค่าซีโอดียังไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2) อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำอันเกิดจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นพลังงาน ในช่วงนี้เองสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์และสารอื่นๆ โดยแบคทีเรียที่ดำรงชีพได้ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria) หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรด (Acid former หรือ Non-methanogenic bacteria) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดโวลาทิลที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดน้ำส้ม (Acetic acid) เป็นกรดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ ดังนั้นแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี

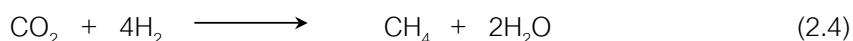
3) อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) กรดโวลาทิลจะถูกเปลี่ยนด้วยกระบวนการอะซิโตเจเนซิสโดยอาศัยแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen –producing acetogenic bacteria) ได้เป็นอะซิเตต (Acetate) ฟอर्मेट (Formate) ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



4) เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน ดังสมการ



ประมาณร้อยละ 72 ของแก๊สมีเทนเกิดจากการสลายตัวของกรดน้ำส้มดังสมการ 2.3 นอกจากนี้แก๊สมีเทนยังเกิดจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่าง แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ดังสมการ



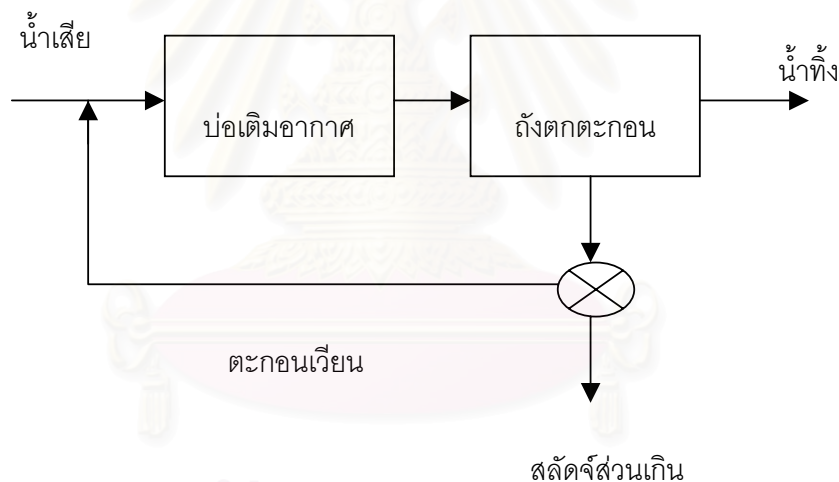
2.7.2.2 การบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic treatment process) (เกรียงศักดิ์, 2539)

เป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยใช้แก๊สออกซิเจน โดยจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นเซลล์ใหม่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบบางชนิด เช่น แอมโมเนีย ไนเตรต ฟอสเฟต ซัลเฟต เป็นต้น ดังปฏิกิริยา



ที่ผ่านมาระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียของชุมชนในประเทศไทยมีด้วยกันหลายระบบ ได้แก่

1) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) และระบบดัดแปลงต่าง ๆ (แสดงดังรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)

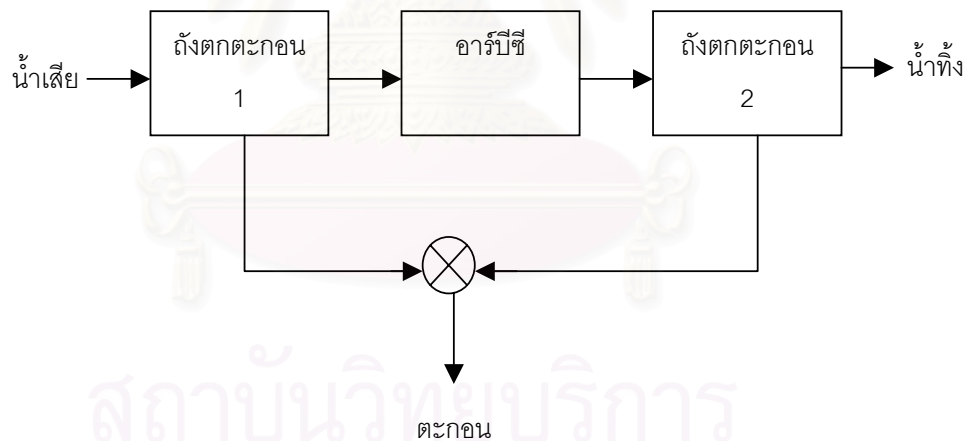
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย มีองค์ประกอบหลักคือ ถังเติมอากาศ และถังตกตะกอน จุลินทรีย์จะอาศัยสารอินทรีย์ในน้ำเสียและออกซิเจนจากการเติมอากาศในถังเติมอากาศเป็นอาหาร เพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณในลักษณะที่เรียกว่าการเจริญเติบโตแขวนลอย (Suspended growth) กลายเป็นตะกอน จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำใสให้ไหลล้นออกไปสู่ระบบบำบัดขั้นสุดท้าย และตะกอนบางส่วนก็จะถูกสูบย้อนกลับเข้าสู่

ถึงเติมอากาศ เพื่อควบคุมปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ แล้วถูกส่งเข้าถังตกตะกอนอีกครั้ง ซึ่งจะเป็นไปอย่างนี้เรื่อย ๆ จนกว่าน้ำจะสะอาด ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง ยังสามารถแยกย่อยต่าง ๆ ได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับการจัดวาง และรูปแบบของถังเติมอากาศ เช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งชนิดธรรมดา (Conventional process) กระบวนการเติมอากาศแบบเรียวลง (Tapered aeration process) กระบวนการเติมอากาศแบบเป็นขั้น (Step-feed aeration process) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีระบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor (SBR)) จัดเป็นระบบที่ดัดแปลงจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง ซึ่งระบบเอสบีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถังเติมอากาศเพียงถังเดียว ทำหน้าที่ทั้ง 2 อย่าง คือ เติมอากาศเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ และแยกตะกอนด้วยการตกตะกอนในถังเดียวกัน

2) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological contractor, RBC)

เป็นระบบให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางทรงกระบอกที่วางอยู่ในถังบำบัด จุลินทรีย์ที่ติดอยู่ที่ตัวกลางจะทำหน้าที่บำบัดโดยใช้ออกซิเจนในอากาศ (ดังรูป 2.3)



รูปที่ 2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ

หลักการของระบบนี้คือ น้ำเสียไหลเข้ามาในถังอาร์บีซี ซึ่งจุลินทรีย์ที่มากับน้ำเสียเป็นประเภทจุลินทรีย์เกาะผิวตัวกลาง (Attached microbial growth) โดยจุลินทรีย์จะเกาะเป็นชั้นๆ ลักษณะคล้ายเมือก เมื่อจานหมุนเริ่มทำงานอากาศจะถูกดูดเข้ามาในระบบ

3) ระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization pond)

- ป่อแอนแอโรบิก อินทรีย์สารในน้ำเสียจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศผลผลิตที่ได้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และแก๊สไข่เน่า
- ป่อแอโรบิก อินทรีย์สารในน้ำเสียจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย จึงทำให้ได้แก๊สออกซิเจน
- ป่อแฟคัลเททีฟ หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นแบบใช้อากาศที่ผิวด้านบนที่แดดส่องถึงและเป็นแบบไร้อากาศที่ก้นบ่อ
- ป่อบ่ม ใช้รองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดต่าง ๆ มาแล้ว

2.7.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment process) (ธงชัย, 2525; Song et al., 2004)

การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี ใช้สำหรับน้ำเสียที่มีคุณลักษณะดังนี้

- มีกรดหรือเบสสูงเกินไป
- มีโลหะหนักที่เป็นพิษ
- มีตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ยาก
- มีสารประกอบอินทรีย์ละลายน้ำที่เป็นพิษ
- มีไขมันหรือน้ำมันที่ละลายน้ำ

โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีมีเทคนิคการบำบัดมากมาย เช่น การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี การทำให้เป็นกลาง การทำลายเชื้อโรค ออกซิเดชัน-รีดักชัน ฯลฯ จึงสามารถปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมได้

1) การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Chemical coagulation หรือ Precipitation)

ตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้ามาก เรียกว่า คอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์ไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนตามธรรมชาติ เนื่องจากมีขนาดเล็กเกินไป ถ้าปล่อยให้วนานๆ จะสามารถจมตัวลงเป็นตะกอนที่แน่นและชั้นมาก บางครั้งจึงต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อช่วยตกตะกอน ได้แก่ สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ และเพอร์รัสซัลเฟต รวมทั้งพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งสารส้มนิยมใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูก การเติมสารก่อนการจับก้อนลงไปทำให้คอลลอยด์หลายๆ อนุภาคจับตัวกันเป็นกลุ่มเรียกว่า ฟล็อก จนมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนได้รวดเร็ว สารเคมีที่ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวประสานให้อนุภาคมารวมกันเป็นฟล็อก เรียกว่า การสร้างตะกอน (Coagulation) ส่วนการที่อนุภาคมารวมตัวกันเพื่อให้มีขนาด

ใหญ่ขึ้น เรียกว่า การรวมตะกอน (Flocculation) แต่เนื่องจากวิธีนี้ ทำให้มีช่องว่างระหว่างเม็ดสารของแข็งแต่ละเม็ดมาก ทำให้ตะกอนเบา มีปริมาณมาก และแตกง่าย ปัจจุบันได้มีศาสตร์ใหม่ เรียกว่า การทำให้เกิดเม็ดเล็ก (Pellet) ซึ่งเม็ดนี้มีขนาดเล็กกว่าฟล็อก แต่ใหญ่กว่าเม็ดสารใดๆ และมีความหนาแน่นสูง จึงจมตัวได้ดี มีปริมาณตะกอนไม่มาก

2) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization)

เป็นการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในสภาพที่เป็นกลาง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดน้ำเสียในขั้นอื่นต่อไป โดยเฉพาะกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพซึ่งต้องการน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 6.5-8.5 แต่ก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดดีแล้วลงสู่ธรรมชาติ ต้องปรับสภาพความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 5-9 ถ้าความเป็นกรด-เบสต่ำจะต้องปรับสภาพด้วยเบส ซึ่งเบสที่นิยมนำมาใช้คือ โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (CaO) หรือแอมโมเนีย (NH₃) เป็นต้น และถ้าน้ำเสียมีความเป็นกรด-เบสสูงต้องทำการปรับสภาพความเป็นกรด-เบสให้เป็นกลางโดยใช้กรด ซึ่งกรดที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ กรดกำมะถัน (H₂SO₄) กรดเกลือ (HCl) หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

3) การทำลายเชื้อโรค (Disinfection)

การทำลายเชื้อโรคในน้ำเสียเป็นการทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคโดยใช้เคมีหรือสารอื่น ๆ โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคมาสู่คนและเพื่อทำลายห่วงโซ่ของเชื้อโรคและการติดเชืวก่อนที่จะปล่อยลงแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งสารเคมีที่ใช้เพื่อกำจัดเชื้อโรค ได้แก่ คลอรีน สารประกอบคลอรีน โบรมีน ไอโอดีน ไอโซน ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล แอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งคลอรีนเป็นสารเคมีที่นิยมใช้มาก

4) ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction)

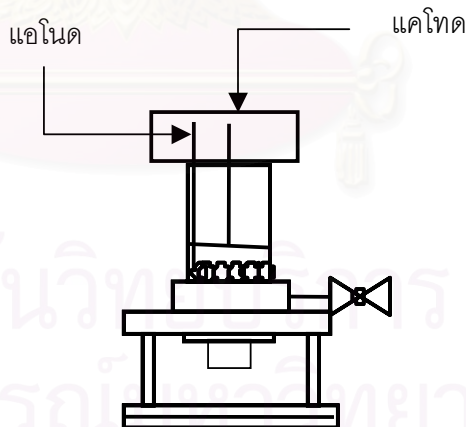
เป็นวิธีการที่ใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ทำได้โดยการเติมสารเคมีซึ่งทำหน้าที่ไปเกิดออกซิเดชันกับสารประกอบโลหะหนัก ได้เป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษ ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน ไอโซน ไนเตรต ไฮโปคลอไรต์ และเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น

2.8 หลักการของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำกระบวนการต่างๆ มาใช้เพื่อลดสี เช่น การบำบัดทางชีวภาพ การบำบัดทางเคมีกายภาพ การบำบัดด้วยเคมีไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งให้ผลที่ดีในระดับหนึ่ง งานวิจัยนี้ได้มีการนำกระบวนการที่เป็นการผลิตผสมผสานระหว่าง ทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า ฟลูอิดเซชัน และวิธีทางเคมีกายภาพ มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสุรา ซึ่งเทคนิคนี้ถูกใช้โดยผ่านทางเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (Pulsed Porous Percolated Electrode หรือ 3PE ดังรูปที่ 2.4) ร่วมกับการตกตะกอน ทำให้น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการจัดเป็นน้ำที่มีสมบัติดีขึ้น

หลักการของเครื่อง 3PE (Roquero et al., 1996; Hunsom et al., 2002)

เครื่อง 3PE เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีรูปแบบร่วมกันของเบดนิ่ง (Fixed bed) และเบดของไหล (Fluidized bed) ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีพื้นฐาน 2 ทฤษฎี คือ ฟลูอิดเซชันและเคมีไฟฟ้า เครื่อง 3PE มีข้อดีคือมีพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาสูง และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสูงเช่นกัน ที่ผ่านมามีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ เช่น การสังเคราะห์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์ การนำโลหะกลับคืน การบำบัดสีและสารอินทรีย์ ฯลฯ สารที่ใช้ทำขั้วแอโนดเป็นสารที่มีความต้านทานสูงต่อการเกิดออกซิเดชันจึงมีการเลือกวัสดุที่ทำจากแพลทินัมและไทเทเนียม นอกจากนี้มีการเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์ (Ti/RuO_2) เพื่อป้องกันการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

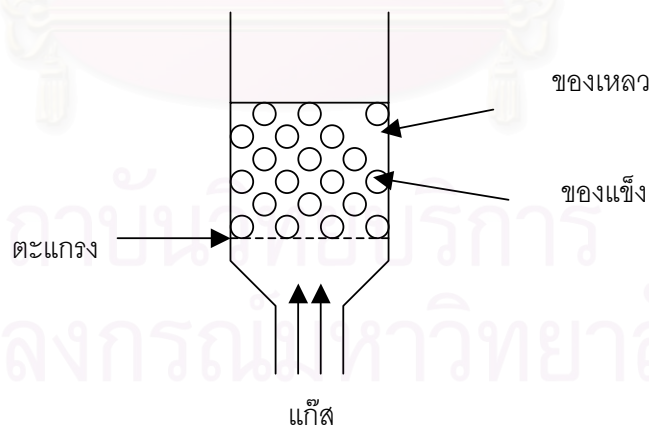
2.8.1 ทฤษฎีพื้นฐานฟลูอิดเซชัน (สมศักดิ์, 2528)

1) นิยามและความหมาย

ฟลูอิดเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดหรือชิ้นของแข็งอยู่ในดังกล่าว แรกทีเดียวถูกวางไว้บนตะแกรงในหอตดลองที่มักจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ปัจจุบันนี้ดัดแปลงให้มีรูปร่างอยู่ในแนวนอนก็มี ของไหลที่ใช้ก็มีแก๊ส หรือของเหลว ปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็ง แล้วไหลออกทางส่วนบนของหอตดลอง เพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็ง ชยับตัว และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้ จะมีสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบดหรือภายในหอตดลอง หรือระหว่างเบดต่อบีตก็ได้ จึงเรียกของแข็งในสถานะนี้ว่า ฟลูอิดเซชัน

2) ลักษณะของฟลูอิดเซชันเบด

คำว่า เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าจะเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตดลองจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตดลอง



รูปที่ 2.5 ฟลูอิดเซชันสามสถานะ

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตดลองเรียบร้อยตามต้องการแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตดลองอย่างช้าๆ (ดังรูปที่ 2.5) ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะ

ไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไอเซชัน ภาษาอังกฤษเขียนได้หลายแบบคือ Incipiently fluidized bed หรือ Bed at minimum fluidization หรือ Onset of fluidization หรือ Fluidizing point หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดเบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอตกลงอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดเบดเจือจาง (Diluted-phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยจะทำให้เม็ดของแข็งหลุดลอยออกจากหอตกลงไป

2.8.2 พื้นฐานของเคมีไฟฟ้า (Bard, 2001; Brett, 1994; ศังกรม, 2549)

องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่

1) ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ถ้าแบ่งขั้วไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทำขั้วจะแบ่งขั้วไฟฟ้าเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Metal electrodes)
- ขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ (Membrane electrodes)

นอกจากนี้ถ้าแบ่งตามหน้าที่และการใช้งานขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

- ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) หรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating electrode)
- ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode)
- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

โดยขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองของเซลล์ ขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน ส่วนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำหน้าที่ช่วยให้ครบวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าช่วย และมักนิยมใช้ในระบบที่มีภาวะที่เชิงเคมีไฟฟ้าเท่านั้น ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือ ให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ไม่แปรตามปริมาณการไหลของ

กระแสไฟฟ้าในวงจร และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาริเซชันในเชิงอุดมคติ (Ideal nonpolarization)

ในการใช้งานทั่วไป ระบบเซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบซึ่งมักเรียกว่าขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกซึ่งมักเรียกว่าขั้วแอโนด

2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในสารละลาย ไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ในกระบวนการเคมีไฟฟ้าสมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและกระบวนการ เช่น ความเข้มข้น องค์ประกอบ ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ

3) แหล่งเหนี่ยวนำพลังงานภายนอก (External conductor)

ในเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell) จำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเป็นตัวป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ เพราะกระบวนการเคมีไฟฟ้าไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้เอง ซึ่งแตกต่างกับเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) ที่ระบบสามารถเกิดปฏิกิริยาให้กระแสไฟฟ้าได้

ลักษณะของเซลล์เคมีไฟฟ้า แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ

- 1) เซลล์ที่ไม่แบ่งแยก (Cell without liquid junction)
- 2) เซลล์ที่แบ่งแยก (Cell with liquid junction)

ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า

1) เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrolytic cell) เป็นเซลล์ที่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการในระบบ เช่น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การแยกโลหะในน้ำเสีย และการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์ เป็นต้น

2) เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ต้องการในระบบ เช่น แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง และถ่านไฟฉาย เป็นต้น

กระบวนการเคมีไฟฟ้า

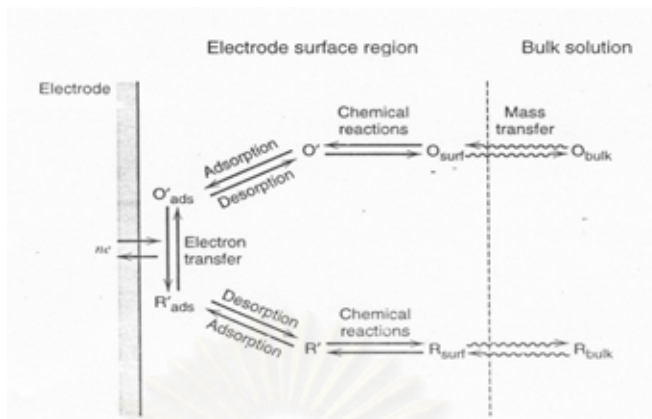
เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า (Electrode) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เกิดขึ้นได้โดยการอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้านั้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งเกิดขึ้นทั้งที่สารซึ่งทำปฏิกิริยากันมิได้สัมผัสกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชันโดยผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น ลวดตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำคือ การไหลของกระแสไฟฟ้านั่นเอง เคมีไฟฟ้าจึงเป็นสาขาหนึ่งของเคมีที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกับมีการไหลของกระแสไฟฟ้า

ปฏิกิริยาในเซลล์เคมีไฟฟ้า (Reaction in electrochemical cell)

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด
- ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) เป็นปฏิกิริยาร่วมระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เคมีไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเม็ดเบดที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะสัมผัสอยู่กับขั้วแอโนดจึงมีสมบัติเป็นขั้วไฟฟ้าบวก และเนื่องจากมีเทคนิคฟลูอิดเซชันเข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้การกระจายตัวของเม็ดเบดได้รับประจุที่เป็นบวกโดยทั่วกัน กลไกการเกิดปฏิกิริยา คือ การเคลื่อนที่ของตัวทำปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) โดยที่ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ที่อยู่ในสารละลาย (Bulk solution) จะเคลื่อนที่เข้าไปยังขั้วแอโนด เพราะตัวรีดิวซ์มีสมบัติเป็นประจุลบด้วยอิทธิพลของแรงทางไฟฟ้าและความแตกต่างของความเข้มข้นทำให้ตัวรีดิวซ์เคลื่อนที่ไปในบริเวณพื้นผิวอิเล็กโทรด (Electrode surface region) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วแอโนด ส่วนตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) ในที่มีอยู่ในสารละลาย จะเคลื่อนที่เข้าไปยังขั้วแคโทดเพราะตัวออกซิไดส์มีสมบัติเป็นประจุบวกด้วยอิทธิพลของแรงทางไฟฟ้าและความแตกต่างของความเข้มข้นทำให้ตัวออกซิไดส์เคลื่อนที่ไปในบริเวณพื้นผิวอิเล็กโทรด (Electrode surface region) เกิดปฏิกิริยารีดักชันรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด และผลิตภัณฑ์ของทั้งสองปฏิกิริยาก็จะถูกปล่อยออกมาที่กลุ่มสารละลายอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงทางเดินของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด
(Bard and Faulkner, 2001)

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°)

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเป็นสมบัติทางกายภาพและเป็นสมบัติเฉพาะตัวของระบบออกซิเดชัน – รีดักชัน ค่า E° ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ ซึ่งเกิดจากครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้างัดกล่าวกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจนและสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีแอกทิวิตี (Activity) เป็นหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า (เพราะศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นศูนย์โวลต์) โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า โดยลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีดังนี้

- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ต้องเป็นขั้วไฮโดรเจนเสมอ
- ตามสัญลักษณ์ของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงอาจถือได้ว่าเป็นค่าศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (Relative reduction potential)
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- ค่าศักย์ไฟฟ้าจะผันแปรไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะเป็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน คือเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงกว่า จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า

ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential)

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพัทธ์ซึ่งนำมาหาศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อรู้ค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงหรือเมื่อศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นศูนย์ การที่ต้องมีการกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนไว้อย่างชัดเจนก็เพื่อจะให้ได้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ ในความหมายเดียวกันโดยสัญลักษณ์ของการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า “ในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ ผลลัพธ์ศักย์ของวงจรถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น” โดยเครื่องหมายของค่าศักย์ที่ได้ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้างกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบกัลวานิก การดำเนินไปของปฏิกิริยารีดักชันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกันถ้าผลลัพธ์ของวงจรเป็นลบแสดงว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนแทน และขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแอโนด

หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิก

$$\Delta U = q - W \quad (2.6)$$

เมื่ออุณหภูมิและความดันคงที่ ระบบเป็นแบบผันกลับได้ (Reversible) จะได้ว่า

$$q = T\Delta S \quad \text{และ} \quad W = W_p + W_e = P\Delta V + W_e \quad \text{และ} \quad W_e = nF\Delta E \quad (2.7)$$

แทนค่าสมการที่ (2.6) ด้วยสมการที่ (2.7)

$$\text{จะได้เป็น} \quad \Delta U = T\Delta S - P\Delta V - nF\Delta E$$

จากความสัมพันธ์ของ Gibbs free energy, ΔG

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = \Delta U + P\Delta V - T\Delta S$$

ฉะนั้น

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (2.8)$$

ในทำนองเดียวกัน ที่ภาวะมาตรฐาน จะได้ว่า

$$\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ \quad (2.9)$$

เมื่อ $-nF\Delta E$ คือ งานไฟฟ้าที่เกิดที่เซลล์ไฟฟ้า (จูล)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์ต่อกรัมสมมูล)

ΔE = ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ΔE° = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

H = เอนทัลปี (จูลต่อกรัม)

S = เอนโทรปี (จูลต่อกรัม.วินาที)

U = พลังงานภายใน (จูลต่อกรัม)

V = ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ การผลักดันให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นงานที่เกิดขึ้นเป็นการลดค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) ที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์คือ

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[Re]^b}{[Ox]^a} \quad (2.10)$$

เมื่อ ΔG = ค่าพลังงานอิสระกับกิบส์หน่วย (จูลต่อโมล)

ΔG° = พลังงานอิสระของกิบส์ของสารที่ภาวะมาตรฐาน (จูลต่อโมล)

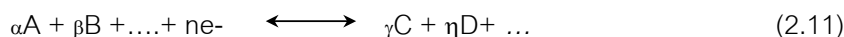
T = อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

R = ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมล)

$\frac{[Re]^b}{[Ox]^a}$ = อัตราส่วนแยกทวิติของสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น

สมการเนินสต์ (Nernst's equation)

จากสมการปฏิกิริยาของ Van't Hoff ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล เช่น ปฏิกิริยา



ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง (ΔG) กับแอกทिवิตีเริ่มต้นของสารตั้งต้นและแอกทिवิตีสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จะเป็น

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[C]^{\gamma} [D]^{\eta}}{[A]^{\alpha} [B]^{\beta}} \quad (2.12)$$

เมื่อ $[C]^{\gamma} [D]^{\eta}$ คือแอกทिवิตีของผลิตภัณฑ์
 $[A]^{\alpha} [B]^{\beta}$ คือแอกทिवิตีของสารตั้งต้น

จากสมการ $\Delta G = -nF\Delta E$ แทนใน (2.12) จะได้

$$-nF\Delta E = -nF\Delta E^0 + RT \ln \frac{[C]^{\gamma} [D]^{\eta}}{[A]^{\alpha} [B]^{\beta}} \quad (2.13)$$

นั่นคือ

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]^{\gamma} [D]^{\eta}}{[A]^{\alpha} [B]^{\beta}} \quad (2.14)$$

สมการเนินสต์สามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์โดยที่ทราบแอกทिवิตีของสารต่าง ๆ ในปฏิกิริยาทราบอุณหภูมิและค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะสังเกตเห็นว่าถ้าแอกทिवิตีเป็นหนึ่งค่า E เท่ากับ E^0 ซึ่งหมายถึงเป็นศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรด

จากสมการ (2.14) ถ้าแทนค่าคงที่ต่าง ๆ ได้แก่ R, F และ T โดยที่ภาวะมาตรฐานซึ่งอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะได้สมการใหม่เป็น

$$E = E^0 - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[C]^{\gamma} [D]^{\eta}}{[A]^{\alpha} [B]^{\beta}} \quad (2.15)$$

หากพิจารณาทั้งเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ครึ่งเซลล์ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเป็น

$$E_{cell} = E_1 - E_2 = E_{cathode} - E_{anode} \quad (2.16)$$

นอกจากนี้แล้วเซลล์เคมีไฟฟ้า ก็เหมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ คือ มีความต้านทานภายใน ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความต้านทานภายใน เกิดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า

ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่เราเรียก ศักย์ของโอห์ม (Ohmic Potential, E_R) ดังนั้นหากจะคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้ถูกต้องจะต้องรวมค่าศักย์ของโอห์มนี้ไปด้วย จะได้สมการใหม่เป็น

$$E_{cell} = E_1 - E_2 + E_R = E_{cathode} - E_{anode} + E_R \quad (2.17)$$

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า (เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านซึ่งกฎของฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณประจุที่ผ่านเข้าไปในระบบ

กฎข้อที่ 2 สำหรับปริมาณประจุที่ใช้ค่าหนึ่งๆ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จะแปรผันตามน้ำหนักสมมูลไฟฟ้าเคมีของผลิตภัณฑ์

จากกฎข้อที่สองของฟาราเดย์สามารถเขียน สมการได้ดังนี้

$$m = \frac{sM_w it}{nF} \quad (2.18)$$

เมื่อ m = มวลของสารนั้น (กรัม)

s = สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี

M_w = น้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

i = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t = เวลาที่ใช้ (วินาที)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา(กรัมสมมูลต่อโมล)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)

ปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = \int Idt \quad (2.19)$$

Q = ประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t = เวลา (วินาที)

ประสิทธิภาพกระแส (Current efficiency, ϕ_c)

สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรไลติก :

$$\Phi_c = \frac{\text{actual chemical charge (desired)}}{\text{theoretical chemical charge}} \quad (2.20)$$

$$\Phi_c = \frac{\text{mass of substance formed}}{\frac{Mit}{nF}}$$

ปริมาณมาตรฐานของประจุคือ คูลอมป์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.28×10^{18} อิเล็กตรอนค่าตัวเลขของหน่วยประจุเกิดจากกฎของคูลอมป์ (Coulomb's law) และกฎของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's law) กฎของคูลอมป์เกี่ยวข้องกับแรงระหว่างอนุภาคของประจุกับปริมาณของประจุ ดังสมการ

$$f = \frac{8.99 \times 10^9 \times (Q_1 Q_2)}{d^2} \quad (2.21)$$

f = แรง (นิวตัน)

d = ระยะทาง (เมตร)

Q1, Q2 = ประจุไฟฟ้า (คูลอมป์)

ค่าคงที่ของสัดส่วน (Proportionality constant) ในกฎของคูลอมป์คือ 8.99×10^9 มีหน่วยเป็น $\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ ซึ่งมีค่า 10^{-7} เท่าของกำลังสองของความเร็วแสง จาก กฎของแมกซ์เวลล์ สามารถได้เทอมของสมการที่ 2.22

$$C^2 = \frac{1}{E_0 \mu_0} = \frac{1}{4\pi E_0} \times \frac{4\pi}{\mu_0} \quad (2.22)$$

C = ความเร็วแสง (เมตรต่อวินาที)

$E_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (คูลอมป์²ต่อนิวตัน-ตร.ม)

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ H / m}$$

ฟาราเดย์เป็นจำนวนของประจุซึ่งผ่านไปออกซิไดส์หรือรีดิวซ์สารหนึ่งโมลสำหรับปฏิกิริยาต่อ 1 อิเล็กตรอน เมื่อระบบต้องการความถูกต้องสูงก็จะใช้ค่า 96500 คูลอมป์ต่ออิกวิวาเลนต์ ดังสมการ

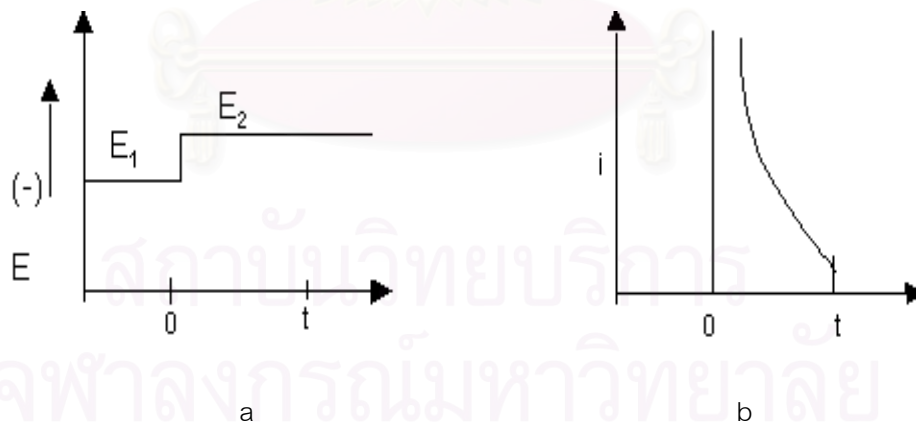
$$\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ electron / equiv}}{6.28 \times 10^{18} \text{ electron / c}} = 96500 \frac{\text{C}}{\text{equiv}} \quad (2.23)$$

การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-potential method or Potentionstatic mode) และการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – current method or Galvanostatic mode) ซึ่งหลักการทำงานแต่ละแบบเป็นดังนี้

1) การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่

พื้นฐานการทำงานเป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้คงที่ ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา เมื่อปรับค่าความต่างศักย์ให้เพียงพอกับไอออนบวกในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้ามีค่าต่ำลงผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่แสดงในรูป 2.7 (a) ตัวออกซิไดส์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ปริมาณของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังแสดงในรูป 2.7 (b) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น



รูปที่ 2.7 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

เมื่อ E_1 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา

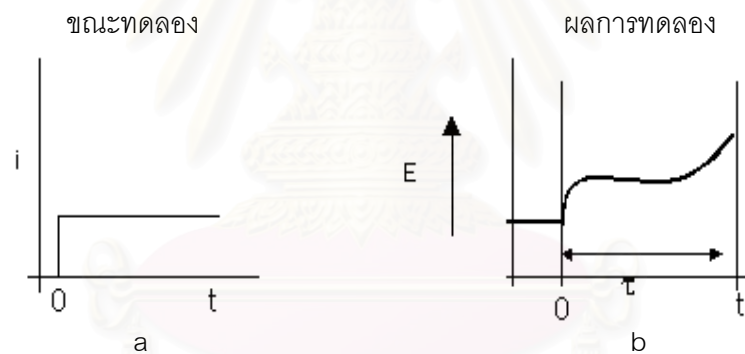
E_2 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเกิด Diffusion limited rate หรือเป็น Mass transfer limited.

2) การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในระบบจะเปลี่ยนไปตามเวลา วิธีการนี้เรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้คงที่ ทำให้สารออกซิไดส์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราคงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) (ดังรูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

การถ่ายโอนมวลสาร ไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลาย ถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ ไมเกรชัน การแพร่ และการพา ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละกระบวนการดังนี้

1) ไมเกรชัน เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหา

แอนโนด ความเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่ประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกันจะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้มีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

2) การแพร่ เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณความเข้มข้นต่ำกว่าจนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลายอัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น

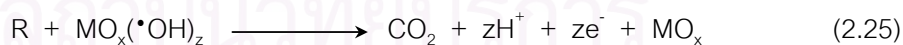
3) การพา เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลาย หรือด้วยกลไกภายนอก เช่น โดยการคนหรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนภายในสารละลาย เป็นต้น

การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย (Chen, 2004; พรเลิศและเกรียงไกร, 2547)

กระบวนการเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี หลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้าคือการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับผิวของขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก

1) กระบวนการ Electrooxidation แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1.1) แบบ Direct electrooxidation ซึ่งจะเกิดสมการดังนี้



โดยที่ $\cdot OH$ ในสมการที่ (2.25) จะมีประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดีกว่า MO_{x+1} ในสมการที่ (2.26)

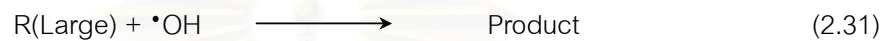
1.2) แบบ Indirect electrooxidation จะเติมสารตัวเติมลงไปในน้ำเสีย เช่น NaCl, H_2O_2 เป็นต้น แสดงสมการได้ดังนี้

สารตัวเติมคือ NaCl

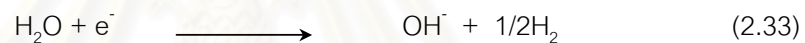
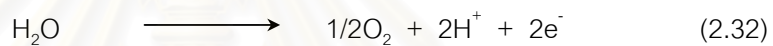


ผลิตภัณฑ์ (Product) สุดท้ายที่เกิดขึ้นได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน และน้ำ ตามลำดับ

สารตัวเติมคือ H_2O_2

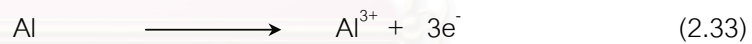


2) กระบวนการ Electroflotation โดยจะใช้ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นตัวพา สารอินทรีย์ให้ขึ้นไปลอยอยู่บนผิวน้ำ แสดงสมการได้ดังนี้



3) กระบวนการ Electrocoagulation ซึ่ง Al^{3+} และ Fe^{2+} จะเป็นสารก่อการจับก้อนในการ ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียตกตะกอนโดยจะเกิดสมการดังนี้

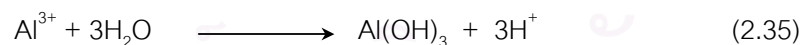
สำหรับอะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนด



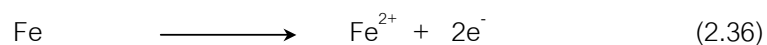
ภาวะที่เป็นแอลคาไลน์ (Alkaline)



ภาวะที่เป็นกรด



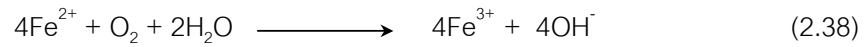
สำหรับเหล็กเป็นขั้วแอโนด



ภาวะที่เป็นแอลคาไลน์



ภาวะที่เป็นกรด



ข้อดีสำหรับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีคือ

1. ไม่ต้องใช้สารเคมีในการบำบัด
2. ไม่ก่อให้เกิดกากของเสียทำให้สามารถแก้ปัญหาในการฝังกลบได้
3. ค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างต่ำ
4. การทำงานง่ายไม่ซับซ้อน
5. มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างสูง

2.9 หลักการตกตะกอน (Everett, 1988 และ Myers, 1999)

ทฤษฎีของสารช่วยตกตะกอน

สารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particles) หรือคอลลอยด์ (Colloid) ไม่สามารถใช้วิธีธรรมดา เช่น การตกตะกอนในการแยกสารขนาดเล็กได้ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการจมตัวช้ามากดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 2.2 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำวิธีการอื่นมาประยุกต์ใช้ วิธีกระบวนการจับก้อน (Coagulation) และกระบวนการจับกลุ่ม (Flocculation) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้กับสารแขวนลอยขนาดเล็กให้สามารถตกตะกอนได้ในทางปฏิบัติก่อนจะกล่าวในรายละเอียดขบวนการนี้ จะขอกกล่าวถึงความหมายของกระบวนการจับก้อนและกระบวนการจับกลุ่มก่อน

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราการจมตัวของสารต่างๆ

ชนิดของสาร	ขนาด (มิลลิเมตร)	พื้นที่ผิว (ตารางเซนติเมตร)	เวลาในการจมตัวต่อ ระยะทาง 1 เมตร (วินาที)
กรวด	10	3.14	1
ทรายหยาบ	1	31.4	10
ทรายละเอียด	0.1	314	125
ดินละเอียด	0.01	3140	108 (นาที)
แบคทีเรีย	0.001	31400	180 (ชั่วโมง)
Colloids	0.0001	314000	755 (วัน)

กระบวนการจับก้อน คือ กระบวนการทำให้สารคอลลอยด์ในน้ำ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าให้เป็นกลางได้ โดยเติมสารเคมีซึ่งเรียกว่า สารก่อการจับก้อน (Coagulant) ซึ่งทำให้สารคอลลอยด์ เมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้กันไม่ผลักกันและมีโอกาสจับเกาะรวมกันเป็นอนุภาคใหญ่ ซึ่งจะทำให้ความเร็วการจมตัวสูงขึ้น

สารก่อการจับก้อนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) สารอนินทรีย์ ได้แก่ สารส้ม (Alum), FeCl_3 , lime, dolomite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), copperas ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sodium aluminate ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$) และ activated silica แต่ที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ สารส้มเพราะราคาถูก

2) สารอินทรีย์ เป็นสารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 100000 อาจเป็นแบบไม่มีประจุ (Nonionic) ประจุบวก (Cationic) หรือประจุลบ (Anionic)

กระบวนการจับกลุ่ม คือกระบวนการเพิ่มขนาดอนุภาคที่ทำให้เป็นกลางแล้ว โดยทำให้สารคอลลอยด์ที่เกาะกันอยู่สามารถเกาะรวมกันได้มากขึ้น โดยเติมสารเคมีซึ่งเรียกว่า สารก่อการจับกลุ่ม (Flocculant) สารคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนเห็นด้วยตาเรียกว่า ฟล็อก (Floc) จะมีความเร็วในการจมตัวสูงขึ้นมาก ทั้งนี้เพื่อทำให้การกรองแยกน้ำออก (Dewatering) ง่ายขึ้น ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายการกรองต่ำลงหรือในกรณีที่ต้องการให้ตกตะกอน จะทำให้ถึงตกตะกอนเร็กลง

สารก่อการจับกลุ่ม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) สารอนินทรีย์ ได้แก่ สารส้ม, ปูนขาว เป็นต้น ในกรณีใช้สารส้มในช่วงแรกๆที่เติมปริมาณน้อย ประจุบวกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นสารก่อการจับก้อน โดยจะไปทำลายประจุลบของอนุภาคสารแขวนลอย เมื่อเติมสารส้มมากขึ้น จะเกิดเป็นตะกอนเบาของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งจะเป็นที่เกาะของอนุภาคต่างๆทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ในขั้นตอนหลังนี้สารส้มทำหน้าที่เป็นสารก่อการจับกลุ่ม

2) สารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1 ล้าน ซึ่งแบ่งย่อยเป็น

- Nonionic เช่น Polyacrylamide, Polyvinylalcohol
- Anionic เช่น Polyacrylates
- Cationic เช่น Polyamines, Polyquaternaries

ทฤษฎีการเกิดคอลลอยด์และการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

สารคอลลอยด์ แบ่งได้เป็น 2 จำพวก คือ

1) สารคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic colloids) เป็นสารคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำจะไม่รวมตัวกับน้ำ เช่น ดิน (Clay) การเติมสารก่อนการจับก้อนไม่สูงมากนักในการทำให้ตกตะกอน เช่น การเติมสารส้มในระบบผลิตน้ำประปา

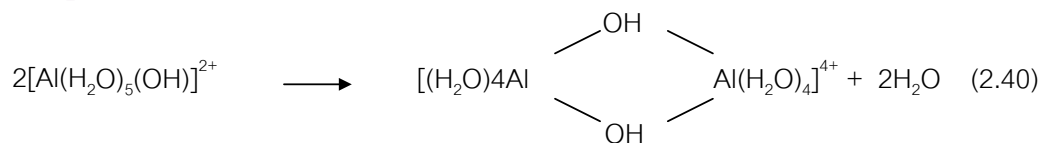
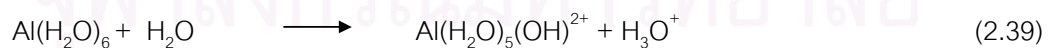
2) สารคอลลอยด์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic colloids) เป็นสารคอลลอยด์ที่มีสมบัติชอบน้ำจะรวมตัวกับน้ำได้ง่าย ซึ่งได้แก่สารอินทรีย์ต่างๆ มักพบในน้ำเสียต่างๆ สารอินทรีย์เหล่านี้อาจทำให้น้ำขุ่นหรือเกิดสี สารก่อนการจับก้อนที่เติมต้องใช้ในปริมาณสูง

อนุภาคขนาดเล็กจะมีประจุไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่มักมีประจุลบ เนื่องจากการแตกตัวของอนุมูลต่างๆ เช่น อะมิโนคาร์บอกซิล (Amino carboxyl) และไฮดรอกไซด์ ดังนั้น เมื่ออนุภาคเหล่านี้มาอยู่ใกล้กันจึงผลักดันไม่สามารถรวมกันได้ จึงทำให้เกิดสภาพแขวนลอยในน้ำ ไม่ยอมจมตัวลงมา เมื่ออนุภาค 2 อนุภาคเข้าใกล้กันจะมีแรงผลักดันเกิดขึ้นและจะมากขึ้น ถ้ามีประจุมากขึ้น แต่เมื่อเข้ากันมากพอ จะมีแรงดูดเข้าหากัน ซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอวาลส์ (Van der waals forces) การวัดแรงผลักดันเนื่องจากประจุไฟฟ้า เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าซีตา (Zeta potential) น้ำธรรมชาติที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 5-8 จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาประมาณ -14 ถึง -30 มิลลิโวลต์ ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าซีตานี้มีค่าใกล้ศูนย์ จะแสดงว่ามีประจุน้อยลงและแรงผลักดันมีค่าน้อยลง ซึ่งจะทำให้มีโอกาสรวมกันของอนุภาคแขวนลอยได้ง่ายขึ้น ดังนั้น จึงใช้การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีตา ขณะเติมสารก่อนการจับก้อนเพื่อให้ทราบถึงปริมาณสารที่ต้องเติมที่เหมาะสมได้

การทำให้อนุภาคไม่ผลักดันและเกิดการรวมตัวกันนั้น ก็คือการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอยนั่นเอง ซึ่งลำดับขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

1) Double-layer repression เป็นการทำลายชั้นประจุ 2 ชั้นรอบอนุภาคโดยเติมไฮเดียมไฮดรอกไซด์ (Na^+) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^+) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al^{3+}) เป็นต้น ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) และปูนขาว (CaO)

ในกรณีใช้สารส้มจะเกิดการแตกตัวเป็นสารเชิงซ้อน รูปต่างๆ ขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบส ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปประจุบวก



2) Charge neutralization โดยเติมสารที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุในชั้นเสเทิร์น (Stern) ซึ่งทำให้ชั้น Stern หรือเชียร์ (Shear) นี้บางลง อนุภาคแขวนลอยจะเหลือชั้นประจุนอก

นอกชั้นเดียว จึงทำให้อนุภาคเหล่านี้สามารถเกาะจับกันได้ง่ายขึ้น สารที่เติมนี้ได้แก่ $C_{12}H_{25}NH_3$ โดยเติมในปริมาณสูง (Overdose) วิธีการนี้ไม่นิยมใช้

3) Bridging เป็นการเติมสารพอลิเมอร์ ซึ่งมีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ดังนั้นสารพอลิเมอร์ทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมอนุภาคต่างๆ มารวมกัน วิธีการนี้ไม่นิยมใช้มากนัก เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

4) Entrapment เป็นการเติมสารก่อนการจับก้อน ในปริมาณสูงมากๆ ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอน ที่มีลักษณะเป็นตะกอนเบา (Sweep-floc) ซึ่งมีปริมาณมากและยากในการแยกน้ำออก (Dewatering) การรวมตัวแบบนี้อาจจัดเป็นแบบกระบวนการจัดกลุ่มได้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พรเลิศ และ เกรียงไกร (2547) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา หรือน้ำกากส่า โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบพัลส์ที่ขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนและน้ำซึมผ่านได้ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันของน้ำกากส่า จะศึกษาโดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ที่ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 1-5 โดยมีขั้วแอโนดคือ แท่งแพลทินัม (Pt) ขั้วแคโทดคือ Pt-RDE ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงปรอทอิ่มตัว โดยใช้ scan rate 0.5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยตัวแปรที่ศึกษาคือชนิดของขั้วแอโนด ความเป็นกรด-เบส อัตราการเจือจาง ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลและผลของตัวเติมจากการศึกษาพบว่า ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมคือไทเทเนียม ภาวะที่เหมาะสมคือความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 1 อัตราการเจือจางเท่ากับ 10 เท่า ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า 9 แอมแปร์ อัตราการไหล 0.9 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยสีและซีไอดีจะลดลงร้อยละ 52.35 และ 51.5 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าสารตัวเติม ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะให้ผลการลดสีและซีไอดีสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร จะช่วยให้ประสิทธิภาพการลดสีและซีไอดีเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 82 และ 89 ตามลำดับ ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งแขวนลอยในน้ำกากส่าลดลงร้อยละ 72.15 และ 70.91 ตามลำดับ

กัญชมาศ และคณะ (2539) ศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำกากส่าด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ระบบการทดลองใช้เซลล์อิเล็กโทรไลติกที่ทำด้วยพลาสติกอะคริลิก ปริมาตร 3 ลิตร ในการทดลองใช้อิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ไทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำ เหล็ก หรือ อะลูมิเนียม จัดเรียงอิเล็กโทรดแบบมอนอโพลาร์ ทำการทดลองแบบกะและใช้ไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการทดลองที่อัตราเจือจางน้ำกากส่า 5 10 20 เท่า ผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและสารอินทรีย์ ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า พื้นที่ผิวอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดระบบที่ใช้

ไทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำเป็นแคโทดและเหล็กเป็นแอโนดมีความเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำกากส่าเจือจาง ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำกากส่าเจือจาง 5 เท่า เพื่อกำจัดสีให้เหลือสีที่ 60 % Transmittance คือ ใช้ไทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำ 2 แผ่นเป็นแคโทด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.8 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 110 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด 5.21 ชั่วโมง ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ร้อยละ 50.4 ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7.0 นอกจากนี้ระบบเคมีไฟฟ้ายังสามารถลดปริมาณสารแคลเซียมและซัลเฟตแต่ไม่สามารถลดปริมาณสารโพแทสเซียมได้

อานนท์ และคณะ (2538) ได้ศึกษาหาสภาพการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำกากส่า โดยระบบหมักยูบีเอฟและระบบเคมีไฟฟ้าในการกำจัดสารอินทรีย์และสี ถึงปฏิกิริยายูบีเอฟเป็นถังเหล็กปลอดสนิมสองชั้น มีปริมาตร 34.7 ลิตร ชั้นนอกเป็นน้ำอุ่นหล่อเพื่อควบคุมอุณหภูมิถังหมักให้อยู่ในช่วง 28-35 องศาเซลเซียส น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำกากส่าเจือจางให้มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ประมาณ 25000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร ส่วนระบบเคมีไฟฟ้าเป็นถังปฏิกิริยาทำด้วยพลาสติกอะคริลิก มีปริมาตร 4 ลิตร ชั่วไฟฟ้าทำด้วยเหล็กแผ่นธรรมดา ผลการทดลองส่วนแรกพบว่า ภาวะที่เหมาะสมคืออัตราป้อนสารอินทรีย์ในการกำจัดสารอินทรีย์และผลิตแก๊สชีวภาพคือ 5.07 และ 7.53 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ตามลำดับ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.53 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ระบบหมักยูบีเอฟมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ 0.3309 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมซีไอดีกำจัด หรือ 0.2256 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมซีไอดีเข้า หรือ 1.6981 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน-ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 39 แก๊สมีเทน และแก๊สอื่นๆ ร้อยละ 61 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีร้อยละ 68.18 ระบบยูบีเอฟไม่สามารถกำจัดสีของน้ำเสียได้ น้ำเสียที่ออกจากระบบยูบีเอฟที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.53 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ได้นำไปบำบัดต่อโดยระบบเคมีไฟฟ้า น้ำเสียที่นำมาทดลองมีความเข้มข้นสารอินทรีย์ 10820 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเวลาที่น้ำเสียอยู่ในเครื่องบำบัดที่เหมาะสมคือ 0.66 ชั่วโมง โดยสามารถลดสีได้ร้อยละ 89.90

มาลี และคณะ (2531) ศึกษาการใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าโรงงานสุราในการผลิตแก๊สชีวภาพ ทำโดยใช้ถังหมักรูปทรงกระบอกติดตั้งในแนวนอน ถังหมักทำด้วยเหล็กไร้สนิม ลักษณะเป็นแบบทวนสมบรูณ์ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการรับสารอินทรีย์ และระยะเวลาเก็บกักน้ำทิ้ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ช่วงการศึกษาคือ อัตราการรับสารอินทรีย์ 2.31-7.41 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน และระยะเวลาเก็บกักน้ำทิ้ง 6.67-11.11 วัน อัตราการรับสาร

อินทรีย์ที่ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุด คือ 5.52 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ที่ระยะเวลาเก็บน้ำทิ้ง 11.11 วัน โดยให้ปริมาณแก๊สชีวภาพ 0.31×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือเกิดแก๊สมีเทนร้อยละ 65.5 และกำจัดชีโอดีร้อยละ 54 ปริมาณชีโอดีเท่ากับ 2.98 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร-วัน

กิตติ และคณะ (2524) ศึกษาวิธีบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุราโดยระบบอโรบิกซีขนาดห้องปฏิบัติการแบบหกตอนใช้ท่อนพีวีซีขึ้นรูปทรงกระบอกกลวงเป็นวัสดุยึดเกาะ พื้นที่แต่ละตอน 0.566 ตารางเมตร น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองได้ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเครื่องกรองไร้อากาศมีค่าชีโอดี 15600 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ตัวแปรศึกษาคือ อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ค่าอินทรีย์บรทุก (79-196 กรัมชีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน) และอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง (1:1 ถึง 1:3) ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีสูงสุดร้อยละ 74.8 ที่ค่าอินทรีย์บรทุก 79 กรัมชีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน และต่ำสุดร้อยละ 44.1 เมื่อค่าอินทรีย์บรทุก 196 กรัมชีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน เมื่อเพิ่มค่าอินทรีย์บรทุกประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ตะกอนแขวนลอย และไนโตรเจนทั้งหมดลดลง แม้จะมีการหมุนเวียนน้ำทิ้งก็ไม่ได้ช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น ส่วนที่ค่าอินทรีย์บรทุกต่ำกว่าการหมุนเวียนน้ำทิ้งการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้งทำให้กำจัดชีโอดี ตะกอนแขวนลอย และไนโตรเจนทั้งหมด มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

Malik และคณะ (2004) ศึกษาจลนศาสตร์ของการกำจัดสีในน้ำเสียที่รับมาจากโรงงานสิ่งทอโดยใช้กระบวนการแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ งานวิจัยนี้ได้ทดสอบเทคนิคกำจัดสีต่างๆ ได้แก่ การให้แสงยูวี การใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่ส่งผลในการกำจัดสีมากนัก ส่วนการให้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงกว่าการให้แสงยูวีอย่างเดียว ในส่วนของกระบวนการที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย การแยกสลายด้วยยูวีและการเกิดออกซิเดชันด้วยอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลที่มีต่อเม็ดสีซึ่งให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา 2 ค่า โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์แบบลำดับหนึ่งเทียม นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-เบสมีผลต่อการกำจัดสีน้อยมาก ส่วนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นให้การกำจัดสีมากขึ้นด้วย ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงการดำเนินงานเดียวกันมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นน้อยมากเนื่องจากการใช้ไปและเกิดขึ้นร่วมกันจึงชัดเจนกันไป ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้ $k_{obs} = 8.11[H_2O_2]^{0.63}$ ทั้งนี้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.88×10^{-3} โมลต่อลิตร ร่วมกับแสงยูวีที่ความเข้มข้นของแสงคงที่ ด้วยระยะเวลาการทำงาน 10 นาที การกำจัดสีทำได้ร้อยละ 97.5 ค่าที่ไอซีลดลงร้อยละ 18.9

Sagwansupyakorn และคณะ (2001) ศึกษาการลดสีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยใช้เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* ตรีงในเม็ดวุ้นแคลเซียมอัลจิเนต ที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไอเซน 3 สถานะ หอปฏิกรณ์มี 2 เครื่องที่ต่อกันแบบอนุกรม อากาศจากเครื่องอัดอากาศถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของหอปฏิกรณ์ผ่านตัวกระจายอากาศด้วยอัตรา 0.075 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง บรรจุเม็ดเชื้อราที่มีอัตราส่วนเซลล์เชื้อรา 60 กรัมต่อสารละลายโซเดียมอัลจิเนต 1,000 มิลลิลิตร ลงในหอปฏิกรณ์ โดยที่เม็ดเชื้อราจะถูกฟลูอิดด้วยน้ำเสียและอากาศ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีค่าหน่วยสีตั้งแต่ 979 ถึง 1,795 หน่วยสี ในหน่วยแพลทินัม-โคบอลต์ โดยจะถูกสูบเข้าหอปฏิกรณ์ ด้วยอัตรา 0.012-0.036 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สารที่มีสีที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกทำให้ลดลงโดยเชื้อราที่อยู่ในเม็ดเชื้อราตลอดความสูงของหอปฏิกรณ์ ภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.030 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อัตราการเติมอากาศ 0.075 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการลดสีร้อยละ 34.8 ในแต่ละคอลัมน์ และยิ่งสีของน้ำเสียจางลงเท่าไร อัตราการไหลของน้ำเสียจะต้องต่ำลงเพื่อให้ น้ำเสียอยู่ในคอลัมน์ได้นานที่สุด โอกาสที่จะสัมผัสกับเอนไซม์จะมากขึ้นตามไปด้วย

Migo และคณะ (1997) ศึกษาการตกตะกอนของสารเมลานอยดินโดยอาศัยไอออนของสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดทางเคมีกายภาพ ในการตกตะกอน พบว่า วาเลนซ์ของไอออนกับความเป็นกรด-เบสมีผลต่อการตกตะกอน โดยไอออนวาเลนซ์บวก 1 ให้ประสิทธิภาพในการเกิดตะกอนได้น้อยกว่าไอออนวาเลนซ์ 2 และ 3 อยู่ประมาณ 50-60 และ 900-1000 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของไอออนที่ได้จากสารอนินทรีย์ ได้แก่ ไอร์ออนคลอไรด์ อะลูมิเนียมคลอไรด์ และพอลิเพอริกไฮดรอกซีซิลเฟตที่ระดับ 0.04 โมลต่อลิตร ให้ความสามารถในการเกิดตะกอนกับสารเมลานอยดินได้ดีที่สุด แต่เมื่อมีตัวแปรของความเป็นกรด-เบสร่วมด้วยจะพบภาวะที่เหมาะสมของความเป็นกรด-เบสต่อไอออนต่างๆที่แตกต่างกันไป โดยพอลิเพอริกไฮดรอกซีซิลเฟต ไอร์ออนคลอไรด์ และไอร์ออนซิลเฟต ที่ความเข้มข้น 57 มิลลิโมลต่อลิตรเท่ากัน ความเป็นกรด-เบส 2-7 3-4.5 และ 3-4.5 ให้ประสิทธิภาพกำจัดสีร้อยละ 95.08 96.55 และ 95.72 ตามลำดับ ส่วนอะลูมิเนียมซิลเฟตที่ความเข้มข้นเดียวกัน ความเป็นกรด-เบส 4-6 ให้ร้อยละ 83.14

Vlyssides และคณะ (1997) นำเสนอเทคนิคใหม่ของการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยวิธีทางเคมีไฟฟ้าเพื่อใช้บำบัดสารไวนาส (Vinasse) ที่มีอยู่ในน้ำกากสา ซึ่งน้ำกากสาที่ใช้เป็นน้ำตาลจากหัวบีท ในการทดลองมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ สารออกซิไดส์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า ได้แก่ คลอรีน คลอเรต เป็นต้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นคือ แก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับช่วงแอมไนด์ อัตราการป้อนสารซีโอดีเข้า (COD loading rate) และความเป็นกรด-เบส จากการทดลองภาวะที่ดีที่สุด คือ ที่ความเข้มข้นของไฮเดียมคลอไรด์ร้อยละ 4 อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส 9.5 ความเข้มข้นของซีโอดีเข้า 72000 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของไวนาส 30 มิลลิเมตรต่อนาที่ ทำให้ได้ค่าซีโอดีลดลงเป็น 20 กรัมต่อชั่วโมงต่อแอมแปร์ต่อตารางเมตร และความเข้มข้นซีโอดีขาออกเท่ากับ 8000 มิลลิกรัมต่อลิตร

Migo และคณะ (1993) ศึกษาการแยกสารเมลานอยดินในน้ำกากส่าโดยใช้สารรวมตะกอนอนินทรีย์ชนิดการค้า (Commercial inorganic flocculant) ที่มีสูตรทางเคมี $[Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}]_m$ โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 32.87 และ 94 สำหรับน้ำกากส่าสด น้ำทิ้งที่ออกจากระบบย่อยสลายแบบชีวภาพ (Biodigester) น้ำทิ้งที่ผ่านทั้งระบบย่อยสลายแบบชีวภาพร่วมกับบ่อลagoon ตามลำดับ ในส่วนของค่าที่ไอซี (Total organic carbon หรือ TOC) ลดลงร้อยละ 21 สำหรับน้ำกากส่าสด และลดลงร้อยละ 73 สำหรับระบบย่อยสลายแบบชีวภาพ และระบบที่ผ่านทั้งระบบย่อยสลายแบบชีวภาพและระบบลagoon ในกรณีของน้ำกากส่าสดมีปริมาณฟลูออไรด์ไอออนอยู่มากพอสมควรทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง การเติมแคลเซียมออกไซด์ 30 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำกากส่าจะช่วยในประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 93

Sirianuntapiboon และคณะ (1988) ได้คัดเลือกกราฟที่มีความสามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ในประเทศไทยจากราทั้งหมด 228 สายพันธุ์ พบว่ามีรา 9 สายพันธุ์ที่มีความสามารถในการกำจัดสีน้ำกากส่าได้มากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งราแต่ละสายพันธุ์มีความต้องการสารอาหารและภาวะที่เหมาะสมในการเจริญ เพื่อการกำจัดสีน้ำกากส่าได้มากที่สุดแตกต่างกัน เช่น ความเข้มข้นของกลูโคส ความเป็นกรด-เบสในอาหารเลี้ยงเชื้อ และชนิดของแหล่งอาหารไนโตรเจน เป็นต้น ในการทดลองนี้พบว่าสายพันธุ์ D-90 มีความสามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ร้อยละ 93 เมื่อเลี้ยงราสายพันธุ์นี้ในสารละลายสีน้ำกากส่าหรือเมลานอยดินที่ได้จากโรงงานผลิตเอทานอลที่ผสมด้วยกลูโคสร้อยละ 2.5 ยีสต์สกัดร้อยละ 0.2 โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 0.1 แมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 0.05 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน ราสายพันธุ์ D-90 นี้ เมื่อนำมาศึกษาพบว่าใน Order mycelia sterilia เนื่องจากมีสายใยสีขาวมีผนังกันในแต่ละเซลล์ ไม่พบการสร้างแคลมป์คอนเนคชัน (Clamp connection) และไม่สร้างสปอร์

Sirianuntapiboon และคณะ (1988) ได้นำราสายพันธุ์ D-90 มาทำการศึกษากำจัดสีน้ำกากส่าต่อ โดยใช้สีน้ำกากส่าจากโรงงานผลิตเอทานอลที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบการให้

อากาศ และไร้อากาศตามลำดับ แล้วนำมาวิเคราะห์ทางเคมี โดยนำบีโอดีและซีโอดี จากการทดลองพบว่ารา D-90 สามารถกำจัดสีของน้ำกากส่าได้ประมาณร้อยละ 90 ในเวลา 10 วัน และลดค่า บีโอดีได้ร้อยละ 80 เมื่อเลี้ยงรา D-90 ในสารละลายสีน้ำกากส่า หรือเมลานอยดินที่ได้จากโรงงานผลิตเอทานอลที่ผสมด้วยกลูโคสร้อยละ 2.5 โซเดียมไนเตรทร้อยละ 0.2 โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 0.1 แมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 0.05 แล้วนำไปผ่านการตกตะกอน นำไประเหย และไดอะไลซ์นำมาปรับความเข้มข้นของสีด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร วัดได้ค่าเท่ากับ 3.5 ปรับความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 6.0 เลี้ยงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน เมื่อการทดลองใช้น้ำกากส่าที่ไม่ได้ใส่สารอาหารลงไปพบว่ารา D-90 สามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้เพียงร้อยละ 17.5 และในภาวะที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อจะสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 70 ในเวลา 11 วัน และลดค่าบีโอดีได้ร้อยละ 90 ในเวลา 15 วัน เมื่อทำการกำจัดสารที่ก่อให้เกิดสีคือเมลานอยดินในระบบกึ่งต่อเนื่อง (Fed batch) พบว่าสามารถกำจัดสีของน้ำกากส่าได้ร้อยละ 80 ในเวลา 10 วันและลดค่าบีโอดีได้ร้อยละ 70

Ohmomo และคณะ (1988) ได้ศึกษาสายพันธุ์ราชนิด *Aspergillus oryzae* Y-2-32 ซึ่งสามารถดูดซับสีน้ำกากส่าด้วยเส้นใยได้ร้อยละ 75 ในเวลา 7 วัน เมื่อเลี้ยงราสายพันธุ์นี้ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเดียวกันกับการทดลองข้างต้น แต่เลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดเลี้ยงเชื้อขนาด 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน จากนั้นนำสายใยของรามานึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำสายใยที่ได้มาดูดซับสารละลายสีน้ำกากส่า พบว่าสายใยราสามารถดูดซับเมลานอยดิน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ได้ดี การดูดซับเมลานอยดินนี้ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลที่ใช้เลี้ยงเชื้อในครั้งแรก เช่น ถ้าใช้กลูโคส กลีเซอรอลและแมนนิทอลเป็นแหล่งอาหารคาร์บอน และใช้เปปโตเนเป็นแหล่งอาหารไนโตรเจน จะทำให้สายใยราสามารถดูดซับสารเมลานอยดินได้ร้อยละ 40.3 66.8 และ 73.2 ตามลำดับ การดูดซับเมลานอยดินนี้สามารถถูกยับยั้งด้วยสารเคมี เช่น ถ้าล้างสายใยด้วย Tween 80 ปริมาณร้อยละ 0.1 การดูดซับจะลดลงครึ่งหนึ่ง และถ้าล้างสายใยด้วย Sodiumdodecyl sulfat ปริมาณร้อยละ 0.1 สายใยจะหมดความสามารถในการดูดซับเมลานอยดิน

Ohmomo และคณะ (1988) ได้คัดเลือกจุลินทรีย์พวกกึ่งไม่ใช้ออกซิเจน (Facultative anaerobe) ที่มีความสามารถกำจัดสีน้ำกากส่า (Melanoidin – decolorizing activity) หรือ MDA โดยคัดเลือกมาจากบ่อเก็บน้ำกากส่าในโรงงานผลิตเอทานอล พบว่ามีแบคทีเรียบางสายพันธุ์ที่มีความสามารถในการกำจัดสีน้ำกากส่าได้โดยเฉพาะ *Lactobacillus hilgardii* สายพันธุ์ W-NS มีความสามารถกำจัดสีน้ำกากส่ามากที่สุด ในภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงเชื้อ สามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ร้อยละ 28 เมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ประกอบด้วย กลูโคสร้อยละ 1.0

ยีสต์สกัดร้อยละ 0.2 เปปโตนร้อยละ 0.3 โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ร้อยละ 0.1 แมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 0.05 ในสารละลายสีน้ำกาฬหรือเมลานอยดินที่ได้รับมาจากโรงงานผลิตเอทานอล เตรียมสารละลายสีน้ำกาฬด้วยวิธีการเดียวกันกับวิธีการข้างต้น ปรับความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7.3 ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต เลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เมื่อทำการปรับปรุงการกำจัดสีน้ำกาฬด้วยวิธีการตรึงเซลล์ด้วยแคลเซียมอัลจีเนตแล้ว พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำกาฬได้เพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 40

Omomo และคณะ (1988) ได้ศึกษาการกำจัดสีน้ำกาฬแบบระบบต่อเนื่องด้วยแบคทีเรีย *Lactobacillus hilgardii* สายพันธุ์ W-NS ที่ตรึงเซลล์ด้วยแคลเซียมอัลจีเนตแล้ว ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีกลูโคสร้อยละ 1 ปรับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.0 เลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำกาฬได้ร้อยละ 90 ในเวลา 1 เดือน ในระหว่างนี้ต้องเติมเปปโตนร้อยละ 0.05 ลงในน้ำกาฬนั้นด้วย และเมื่อทำการทดลองในถังหมักคอลัมน์ (column – type reactor) จะไม่สามารถบำรุงรักษาเชื้อได้ และการกำจัดสีน้ำกาฬจะลดลงครึ่งหนึ่งในเวลา 5 วัน เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7.3 การกำจัดสีก็ลดลงอีก

Ohmomo และคณะ (1987) ได้คัดเลือกสายพันธุ์ที่มีความสามารถกำจัดสีน้ำกาฬในประเทศไทย พบว่ารา *Aspergillus fumigatus* สายพันธุ์ G-2-6 สามารถกำจัดสีน้ำกาฬได้ร้อยละ 75 ในเวลา 3 วัน เมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อ Glycerol – Peptone ซึ่งประกอบด้วยซีเซอรอลร้อยละ 5 เปปโตนร้อยละ 0.5 โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 0.1 แมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 0.05 ในสารละลายสีน้ำกาฬหรือเมลานอยดินที่ได้จากโรงงานผลิตเอทานอล ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ด้วยวิธีการเขย่าและในการนำสายใยกลับมาใช้อีก พบว่าสายใยของราดังกล่าวสามารถกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 60 โดยการเติมกลีเซอรอลร้อยละ 4 ลงไปอีก การกำจัดสีแบบต่อเนื่องในถังหมักขนาดเล็ก (Jar fermenter) พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำกาฬได้ร้อยละ 70 และในขณะเดียวกันยังสามารถลดค่าซีไอดีลงได้ร้อยละ 50 และลดสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนลงได้ร้อยละ 56 ส่วนการกำจัดสีแบบต่อเนื่องของสารละลายสีน้ำกาฬที่ไม่ได้ผ่านการไดอะไลซิสนั้น พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำกาฬได้ร้อยละ 40 และสามารถลดค่าซีไอดี สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนลงได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Ohmomo และคณะ (1985) ได้ศึกษาการกำจัดสีน้ำกาฬอย่างต่อเนื่อง (Continuous decolorization of molasses waste water) โดยเห็ด *Coriolus versicolor* Ps4a โดยใช้สีน้ำกาฬจากโรงงานผลิตยีสต์ทำขนมปังที่ผ่านการบำบัด โดยการนำไปผ่านการหมักแก๊สมีเทนและการให้อากาศเลี้ยงตะกอนแล้ว การทดลองใช้สายใยที่เป็นเพลเลียทในขวดเขย่า เติมกลูโคสร้อยละ 0.5

เปปโตนร้อยละ (Peptone) 0.5 ให้อากาศในรูปออกซิเจนที่ละลายได้ปริมาณ 1 ppm เมื่อทำการกำจัดสีต่อเนื่องในถังหมักแบบฟองอากาศ (Bubbling column reactor) จะกำจัดสีได้ร้อยละ 75 ในเวลา 20 ชั่วโมงและเมื่อทำการกำจัดสีเป็นเวลานานด้วยการตรึงเซลล์ด้วยแคลเซียมอัลจีเนตเจล (Calalginate gel) พบว่าสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 65.7 ในเวลา 16 วัน

Aoshima และคณะ (1985) ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีน้ำกากส่า พบว่ามีในพวกราที่มีสายใยสีขาว (White-rot fungi) โดยเฉพาะในเห็ด *Coriolus versicolor* Ps4a ซึ่งสามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ร้อยละ 80 เมื่อเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคส ร้อยละ 5 เปปโตนร้อยละ 0.5 โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 0.1 แมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 0.05 ในสารละลายสีน้ำกากส่าจากโรงงานผลิตยีสต์ทำขนมปัง 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน MDA นี้ เกิดจากเอนไซม์ภายในเซลล์ ซึ่งถูกชักนำโดยสี ในน้ำกากส่า (Molasses pigment) เอนไซม์นี้มี 2 ชนิดคือ เอนไซม์ที่ขึ้นอยู่กับน้ำตาล (Sugar dependent enzyme) และเอนไซม์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำตาล (Sugar independent enzyme) การกำจัดสีของเอนไซม์ดังกล่าวเป็นการย่อยสลายสีของน้ำกากส่านั่นเอง

Watanabe และคณะ (1982) ศึกษาเห็ด *Coriolas* sp. No. 20 ซึ่งสามารถใช้กำจัดสีในน้ำกากส่าได้ร้อยละ 80 เมื่อเลี้ยงในอาหารเชื้อที่ประกอบด้วย แอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) 1.5 กรัม โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 10 กรัม แมกนีเซียมซัลเฟต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.5 กรัม ในสารละลายสีเมลานอยดินที่สังเคราะห์ขึ้นเองด้วยวิธีการข้างต้นปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-เบส 6.4 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ การกำจัดสีพบว่าเกิดจากเอนไซม์ภายในเซลล์ (Intracellular enzyme) ซึ่งสามารถสกัดได้จากสายใยของเห็ดที่กำลังเจริญ เอนไซม์นี้มีชื่อว่า ซอร์โบสออกซิเดส (Sorboside oxidase) ปฏิกริยาของเอนไซม์นี้จะไปออกซิไดส์กลูโคสให้ได้ แอคทีฟออกซิเจน (Active oxygen) และแอคทีฟออกซิเจนนี้จะไปกำจัดสีเมลานอยดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและหาภาวะที่เหมาะสมซึ่งมีผลต่อการลดลงของสีและสารประกอบโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ในระบบการทำงานทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง ผลสืบเนื่องจากงานวิจัยนี้สามารถนำมาเป็นข้อมูลสำหรับขยายส่วนอุปกรณ์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

งานวิจัยนี้แบ่งได้เป็น 4 ตอน คือ

ตอนที่ 1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากส่า

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

- 1.1) การวิเคราะห์หาค่าสมบัติของน้ำกากส่า ซึ่งตัวแปรที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้า อุณหภูมิ สี ซีไอดี บีไอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งไม่ละลายน้ำ เป็นต้น
- 1.2) การหาความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงของน้ำกากส่าโดยเครื่อง UV spectrophotometer
- 1.3) การทดสอบการเกิดออกซิเดชันของน้ำกากส่าในเครื่องโพเทนทิโอสแตต (Potentiostat/Galvanostat)

ตอนที่ 2 ระบบปฏิบัติการแบบกะ

ทำการศึกษาการบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำกากส่า โดยเริ่มแรกเป็นการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และการตกตะกอน ซึ่งจัดให้มีการศึกษาแยกกันของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองก่อนนำมาผสมผสานกันหรือทำงานร่วมกันในภายหลัง เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อการลงทุนกับภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองแบบกะจะถูกนำมาใช้กับระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่องในลำดับต่อไป ขั้นตอนของการศึกษามีดังนี้

แบ่งการศึกษาออกเป็น 6 ส่วน คือ

- 2.1) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารตกตะกอนในถังตกตะกอน
- 2.2) ศึกษาชนิดของเม็ดขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

- 2.3) ศึกษารูปแบบการทำงานร่วมกันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ และถังตกตะกอน
- 2.4) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์
- 2.5) ศึกษาผลกระทบของความเข้มกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์
- 2.6) ศึกษาและหาสมการจลนพลศาสตร์ (Kinetics equation)

ตอนที่ 3 ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง

ทำการศึกษารอบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำกากส่า โดยการนำข้อมูลจากส่วนของระบบปฏิบัติการแบบกะมาประยุกต์การทำงานและใช้อ้างอิงในการทำงานของระบบต่อเนื่องซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าระบบแบบกะ ขั้นตอนของการศึกษามีดังนี้

แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน

- 3.1) ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ (Steady state)
- 3.2) ศึกษาผลกระทบจากการย้อนกลับและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ (Steady state)

ตอนที่ 4 ต้นทุนการบำบัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Horiba รุ่น F-22
- 2) ขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์ (Ti/RuO₂) เม็ดไทเทเนียม และ เม็ดแกรไฟต์
- 3) เครื่องกวนแม่เหล็ก
- 4) เครื่องชั่งละเอียด และเครื่องชั่งหยาบ ยี่ห้อ Sartorius
- 5) ตู้อบ (Drying oven) ยี่ห้อ Termaks รุ่น series TS 8000
- 6) นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ Casio
- 7) เครื่องวิเคราะห์ค่า TOC (Total organic carbon)
- 8) เครื่อง UV spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V – 530
- 9) กระดาษกรองเบอร์ 1 ยี่ห้อ Whatman เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 110 มิลลิเมตร
- 10) กระดาษกรอง GF/C ยี่ห้อ Whatman เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 47 มิลลิเมตร
- 11) เครื่องดูดสุญญากาศพร้อมขวดดูดสุญญากาศ (Suction pump)

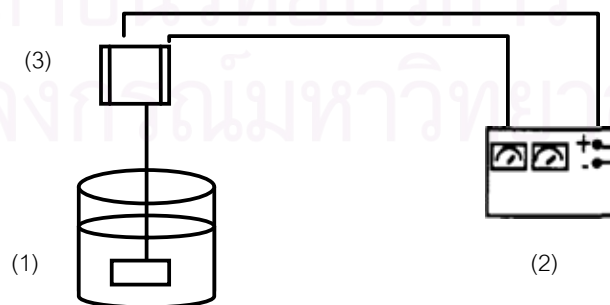
- 12) หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 20x 150 หรือ 25x150 มิลลิเมตร มีฝาทำด้วยทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene, TFE)
- 13) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
- 14) ขวดบีโอดี (BOD bottle) ขนาด 250 - 300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิด
- 15) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส
- 16) ชุดกลั่น (Distillation apparatus)
- 17) เครื่องทำน้ำกลั่น ยี่ห้อ Becthai รุ่น 2004
- 18) เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- 19) เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์
- 20) ถังตกตะกอน (Precipitated tank)
- 21) เครื่องควบคุมจังหวะของอากาศ (Control air)
- 22) เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ยี่ห้อ Fusheng รุ่น HTA-120
- 23) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น GPR-1820HD
- 24) ปั๊ม รุ่น NH-5PX
- 25) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)

3.3 การติดตั้งระบบ

การทำงานประกอบด้วย 2 ระบบ คือระบบกะและระบบต่อเนื่อง

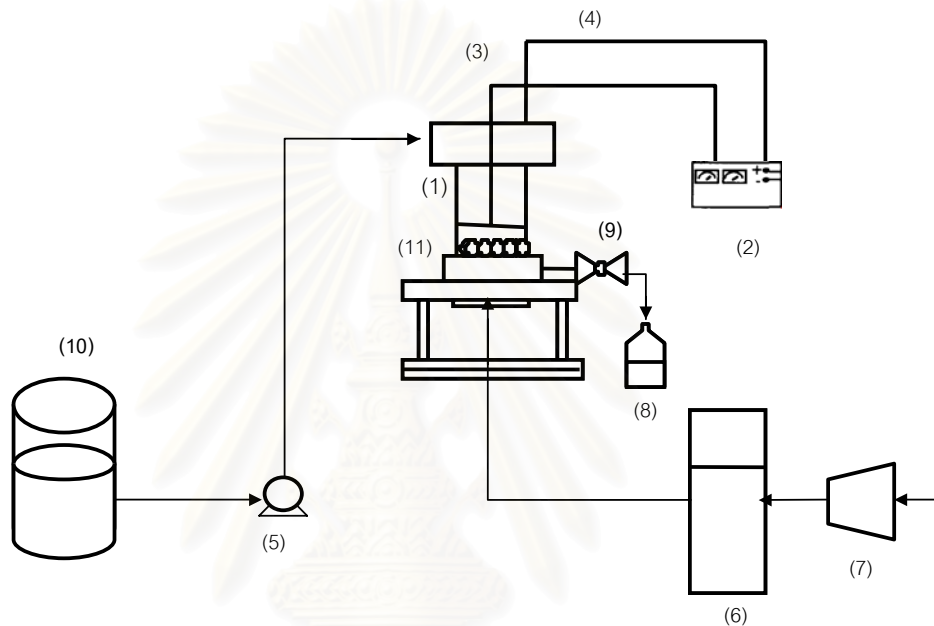
3.3.1 ระบบแบบกะ

- 1) ถังตกตะกอน ใช้ศึกษาความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 3.1 ถังตกตะกอน (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) มอเตอร์ปั๊ม (3)

- 1.1) ถังแก้ว ขนาด 12 ลิตร
 - 1.2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น GPR-1820HD
 - 1.3) มอเตอร์ใบพัด
- 2) เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ ใช้ศึกษาและเปรียบเทียบขั้วอิเล็กโทรดแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย



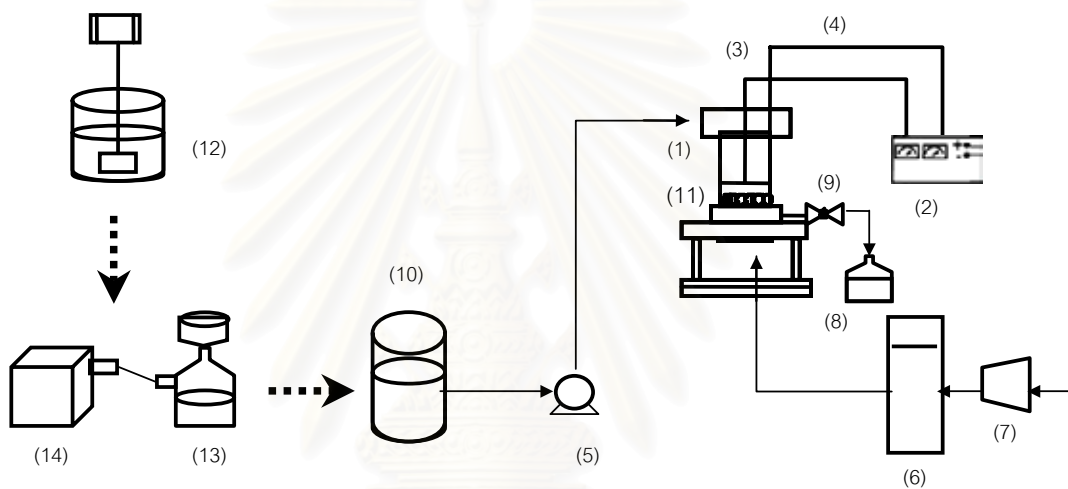
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) ขั้วแอโนด (4) บั๊ม (5) เครื่องควบคุมอากาศ (6) เครื่องอัดอากาศ (7) ขวดเก็บสาร (8) วาล์ว (9) ถังเก็บน้ำอากาศ (10) เม็ดอิเล็กโทรด (11)

- 2.1) เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20.5 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร
- 2.2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น GPR-1820HD
- 2.3) ขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำจากไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์
- 2.4) ขั้วไฟฟ้าแอโนด ทำจากไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์
- 2.5) บั๊ม รุ่น NH-5PX
- 2.6) เครื่องควบคุมอากาศ ความดันอากาศที่ใช้ 2.0-2.5 บาร์
- 2.7) เครื่องอัดอากาศ ความดันอากาศสูงสุด 10 บาร์
- 2.8) ขวดเก็บสาร ขนาด 150 มิลลิลิตร

- 2.9) วาล์ว ชนิด Ball valve
- 2.10) ถังเก็บน้ำกากส่า ขนาด 50 ลิตร
- 2.11) เม็ดแกรไฟต์หรือเม็ดไทเทเนียม หนัก 500 กรัม

3) เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปพุนแบบพัลส์ร่วมกับการตกตะกอน แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

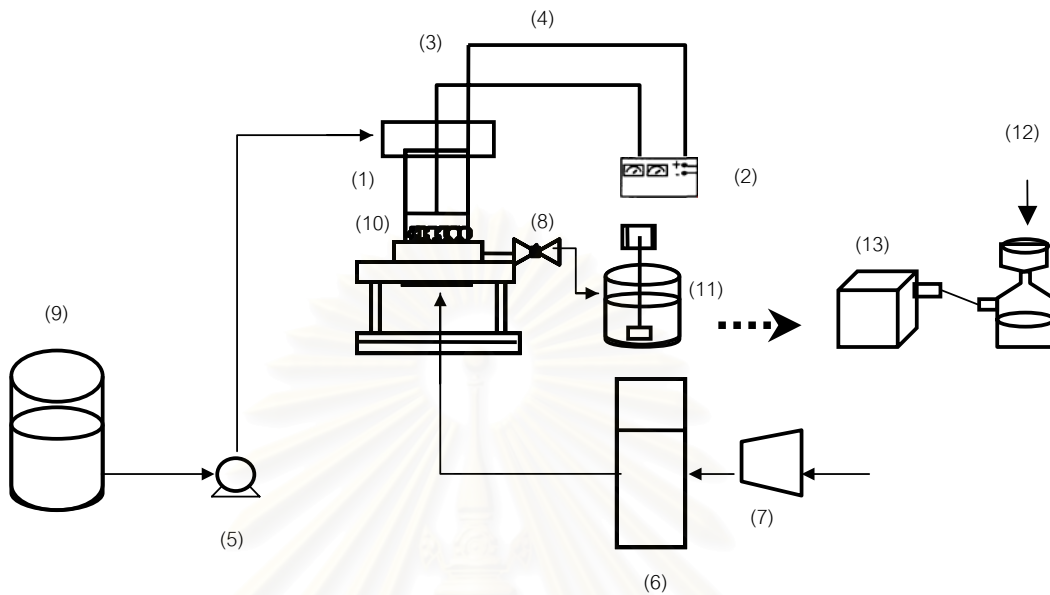
3ก) การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปพุนแบบพัลส์ เรียกว่า Pretreatment process แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปพุนแบบพัลส์ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) ขั้วแอโนด (4) ปั๊ม (5) เครื่องควบคุมจังหวะของอากาศ (6) เครื่องอัดอากาศ (7) ขวดเก็บสาร (8) วาล์ว (9) ถังเก็บน้ำกากส่า (10) เม็ดอิเล็กโทรด (11) ถังตกตะกอน (12) ขวดดูดสุญญากาศและกรวยกรอง (13) เครื่องดูดสุญญากาศ (14)

- 3.1ก) ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 3.3.1 หัวข้อ 2
- 3.2ก) เม็ดแกรไฟต์ หนัก 500 กรัม
- 3.3ก) ถังตกตะกอน ขนาด 12 ลิตร
- 3.4ก) ขวดดูดสุญญากาศ ขนาด 500 มิลลิลิตร และกรวยกรองขนาด 110 มิลลิเมตร
- 3.5ก) เครื่องดูดสุญญากาศ

3ข) การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังจากผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ เรียกว่า Posttreatment process แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วย

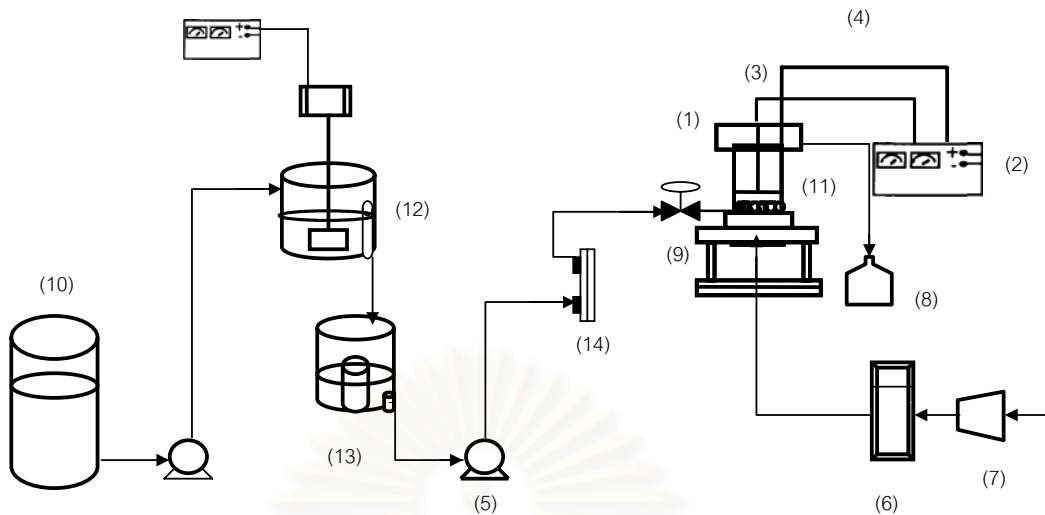


รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) ขั้วแอโนด (4) ปั๊ม (5) เครื่องควบคุมจังหวะของอากาศ (6) เครื่องอัดอากาศ (7) วาล์ว (8) ถังเก็บน้ำกากส่า (9) เม็ดอิเล็กโทรด (10) ถังตกตะกอน (11) ขวดดูดสุญญากาศและกรวยกรอง (12) เครื่องดูดสุญญากาศ (13)

3.1ข) ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองเหมือนการทดลองที่ 3.3.1 หัวข้อ 3ก

3.3.2 ระบบแบบต่อเนื่อง

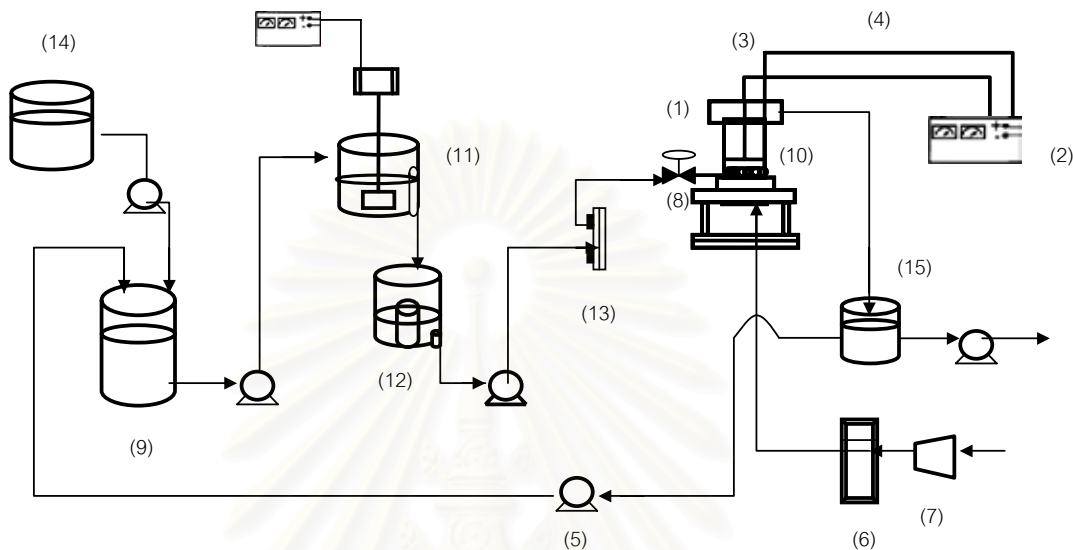
1) นำรูปแบบการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (Pretreatment process) มาใช้ศึกษาอัตราการไหลต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 3.5 เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปทรงแบบพัลส์ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) ขั้วแอโนด (4) บี้ม (5) เครื่องควบคุมจังหวะของอากาศ (6) เครื่องอัดอากาศ (7) ขวดเก็บสาร (8) วาล์ว (9) ถังเก็บน้ำกากส่า (10) เม็ดอิเล็กโทรด (11) ถังตกตะกอน (12) ถังพักตะกอน (13) เครื่องวัดอัตราการไหล (14)

- 1.1) เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปทรงแบบพัลส์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20.5 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร
- 1.2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น GPR-1820HD
- 1.3) ขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำจากไททาเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์
- 1.4) ขั้วไฟฟ้าแอโนด ทำจากไททาเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์
- 1.5) บี้ม รุ่น NH-5PX
- 1.6) เครื่องควบคุมอากาศ ความดันอากาศที่ใช้ 2.0-2.5 บาร์
- 1.7) เครื่องอัดอากาศ ความดันอากาศสูงสุด 10 บาร์
- 1.8) ขวดเก็บสาร ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 1.9) วาล์ว ชนิด ball valve
- 1.10) ถังเก็บน้ำกากส่า ขนาด 50 ลิตร
- 1.11) เม็ดแกรไฟต์ หนัก 1000 กรัม
- 1.12) เครื่องตกตะกอน ขนาด 10 ลิตร
- 1.13) ถังพักตะกอน ขนาด 10 ลิตร
- 1.14) เครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งใช้ในช่อง 0.5-1.5 ลิตรต่อชั่วโมง

2) นำรูปแบบการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (Pretreatment process) มาใช้ในการศึกษาการป้อนย้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 3.6 เครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) ขั้วแอโนด (4) ปั๊ม (5) เครื่องควบคุมจังหวะของอากาศ (6) เครื่องอัดอากาศ (7) วาล์ว (8) ถังเก็บน้ำอากาศย้อนกลับ (9) เม็ดอิเล็กโทรด (10) ถังตกตะกอน (11) ถังพักตะกอน (12) เครื่องวัดอัตราการไหล (13) ถังเก็บน้ำอากาศก่อนบำบัด (14) ถังเก็บน้ำอากาศหลังบำบัด (15)

- 2.1) ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองเหมือนการทดลองที่ 3.3.2 หัวข้อ 1
- 2.2) ถังเก็บน้ำอากาศย้อนกลับ ขนาด 50 ลิตร
- 2.3) ถังเก็บน้ำอากาศก่อนบำบัด ขนาด 30 ลิตร
- 2.4) ถังเก็บน้ำอากาศหลังบำบัด ขนาด 2 ลิตร

3.4 สารเคมี

ชื่อสารเคมี	(บริษัท, ความบริสุทธิ์)
1) โคบอลต์คลอไรด์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	(Merck, AR grade)
2) โพแทสเซียมคลอโรแพลทีเนต (K_2PtCl_6)	(Carlo, AR grade)
3) โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)	(Merck, AR grade)

4) กรดซัลฟิวริก (conc.H ₂ SO ₄)	(Fisher, 98%)
5) กรดไนตริก (conc.HNO ₃)	(Carlo, 65%)
6) ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag ₂ SO ₄)	(POCh. S.A., AR grade)
7) ไอร์รอน (II) แอมโมเนียซัลเฟต (Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ •6H ₂ O)	(Unilab, AR grade)
8) สารละลายเฟอโรอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator)	(Labchem, AR grade)
9) โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH ₂ PO ₄)	(Univer, AR grade)
10) ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K ₂ HPO ₄)	(Univer, AR grade)
11) ไดโซเดียมฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต (Na ₂ PO ₄ •7H ₂ O)	(Univer, AR grade)
12) แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH ₄ Cl)	(Univer, AR grade)
13) แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (MgSO ₄ •7H ₂ O)	(Univer, AR grade)
14) แคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous CaCl ₂)	(Univer, AR grade)
15) เฟอริคคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (FeCl ₃ •6H ₂ O)	(Univer, AR grade)
16) แมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต (MnSO ₄ •H ₂ O)	(Univer, AR grade)
17) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	(Univer, AR grade)
18) โซเดียมไอโอไดด์ (NaI)	(Labchem, AR grade)
19) โซเดียมเอไซด์ (NaN ₃)	(Labchem, AR grade)
20) โซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (Na ₂ S ₂ O ₃ •5H ₂ O)	(Univer, AR grade)
21) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	(Carlo, AR grade)

3.5 น้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่นำมาใช้เพื่อการบำบัดในงานวิจัยนี้ คือน้ำกากส่าได้รับความอนุเคราะห์มาจาก บริษัท สุราแสงโสม จำกัด จ.นครปฐม โดยน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียก่อนเข้าบำบัด ซึ่งมีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม กลิ่นฉุน มีค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 4-5 ก่อนการบำบัดจำเป็นต้องใช้น้ำตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์มาจากการนำน้ำกากส่าที่มีความเข้มข้นสูงไปผสมกับน้ำกลั่นด้วยอัตราเจือจาง 10 เท่า เพราะน้ำกากส่าเริ่มต้นมีความสกปรกสูง

3.6 ขั้นตอนการวิจัย

ตอนที่ 1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากส่า

3.6.1) เก็บน้ำกากส่าจากบริษัท สุราแสงโสม จำกัด จังหวัดนครปฐมและวิเคราะห์สมบัติของน้ำกากส่าเบื้องต้นทั้งทางกายภาพและเคมี ปัจจัยที่วิเคราะห์มีดังนี้

- ความเป็นกรด-เบส

- อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
- การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)
- ของแข็งละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร) หรือ Total dissolved solids : TDS
- ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร) หรือ Total suspended solids: TSS
- ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร) หรือ Total solids: TS
- บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) หรือ Biological oxygen demand: BOD
- ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) หรือ Chemical oxygen demand: COD
- สี (หน่วยสี)

หมายเหตุ วิธีการวิเคราะห์ห้อยู่ในภาคผนวก ค

3.6.2) หาค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงในน้ำกากส่าด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer

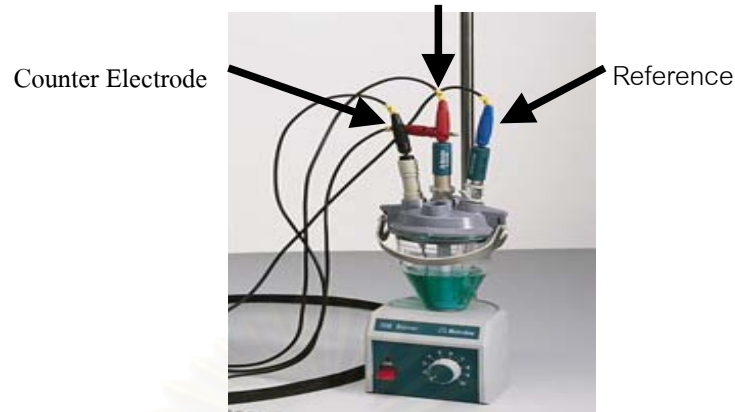
หมายเหตุ วิธีการวิเคราะห์ห้อยู่ในภาคผนวก ค

3.6.3) การทดสอบการเกิดออกซิเดชันของน้ำกากส่าในเครื่องโพเทนทิโอสแตต (potentiostat) ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ (พรเลิศและเกรียงไกร, 2547)

เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ใช้สำหรับศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของน้ำกากส่า โดยใช้แท่งแพลทินัมเป็นขั้วนับ (Counter Electrode, C.E.), ส่วนขั้วทำงาน (Working Electrode, W.E.) เป็นแพลทินัมชนิดที่ขั้วเป็นตัวหมุน (Pt-RDE) ที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือขั้วไฟฟ้าอ้างอิงปรอทอมั้มตัว ในการศึกษา จะใช้อัตราการตรวจจรวด (Scan rate) ที่ 0.5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที



รูปที่ 3.7 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

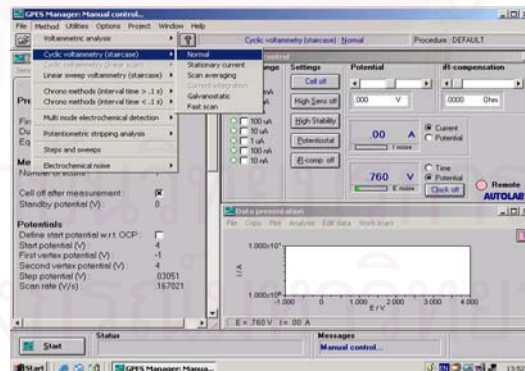


รูปที่ 3.8 Rotating Disc Electrode (RDE)

วิธีการทดลอง

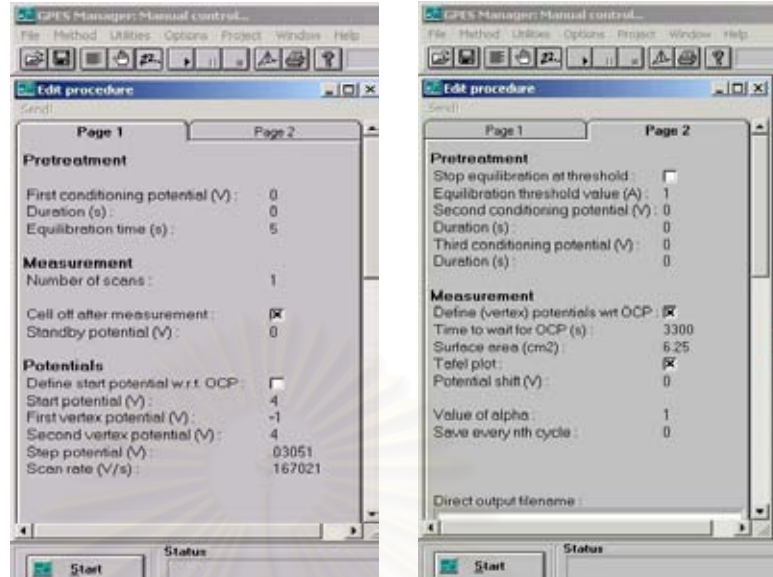
การหารูปภาพโพลาริแกรมด้วยโปรแกรม GPES

- 1) ตรวจสอบการทำงานของ USB interface ก่อนการเปิดเครื่องทุกครั้ง (ดูได้จากการทำงานของพัดลมระบายความร้อน)
- 2) เปิดเครื่อง Autolab แล้วตามด้วยคอมพิวเตอร์ อุ่นเครื่อง Autolab ก่อนการทดลอง 20 นาที
- 3) เปิดโปรแกรม GPES เลือกเมนู Method → Cyclic voltammetry (staircase) → Normal ดังแสดงในรูปที่ 3.9



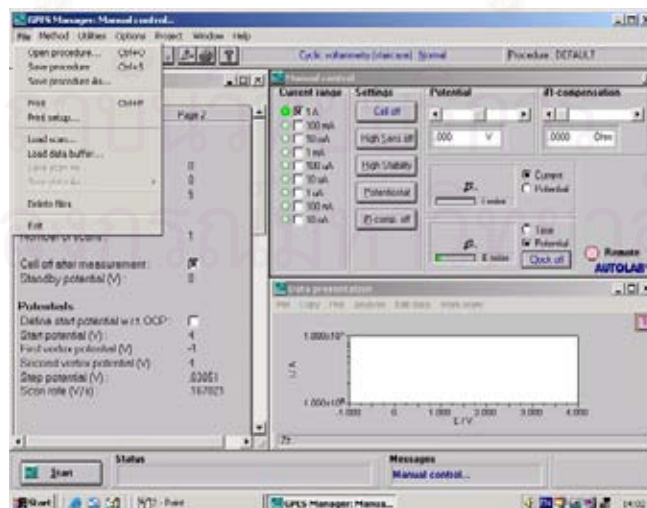
รูปที่ 3.9 การเปิดโปรแกรม GPES

- 4) ในหน้าที่ 1 และหน้าที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ให้ป้อนค่าต่างๆที่ใช้ในการทดสอบตามรูปที่ 3.3 และสามารถระบุรายละเอียดของชิ้นงานที่ทดสอบได้ โดยป้อนชื่อชิ้นงานและรายละเอียดในส่วน Title and subtitle ในหน้า 1



รูปที่ 3.10 การป้อนค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบด้วยโปรแกรม GPES

- 5) เมื่อต่อสายต่างๆ เข้าที่ Test cell เรียบร้อยแล้ว เริ่มทำการทดสอบโดย กดปุ่ม Cell enable ที่เครื่อง Potentiostat แล้วกดปุ่ม start ที่หน้าจอ GPES
- 6) หลังการทำงาน ถ้าต้องการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ เลือกเมนู File แล้วเลือก Save procedure as ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และถ้าต้องการเก็บผลกราฟที่ได้เลือก File จากนั้นเลือก Save work data ที่หน้าต่าง Data presentation
- 7) ถ้าต้องการ Load ผลการทดลองที่เคยทำมาวิเคราะห์ ให้เลือก File ต่อมาเลือก Load scan แล้วเลือกชื่อ File ที่ทำการ Save ไว้



รูปที่ 3.11 วิธีการบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตอนที่ 2 ระบบปฏิบัติการแบบกะ

3.6.4) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารตกตะกอนในถังตกตะกอน

วิธีการทดลอง

- 1) นำกากส่าที่อัตราเจือจาง 10 เท่า ผสมกับสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ระดับความเข้มข้นในช่วง 0 - 27 กรัมต่อลิตร
- 2) ทำการติดตั้งและเชื่อมระบบเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า
- 3) ทำการทดลองตามหลักการ Jar test
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างหลังการบำบัดแล้วด้วยปริมาณ 100 มิลลิลิตร
- 5) นำไปวิเคราะห์ค่าสมบัติต่างๆ

3.6.5) ศึกษาชนิดของเม็ดชีวไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

วิธีการทดลอง

- 1) นำกากส่าที่อัตราเจือจาง 10 เท่า ปริมาตร 10 ลิตร ความเป็นกรด-เบส 3 ถูกบีบเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ 3PE
- 2) บรรวจเม็ดชีวไฟฟ้าลงในเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ซึ่งเม็ดชีวไฟฟ้าที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ เม็ดไทเทเนียม และเม็ดแกรไฟต์ ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด น้ำหนักที่ใช้ 500 กรัม โดยประมาณ ตะแกรงที่รองรับเม็ดเบดนี้ทำจากไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ ส่วนตะแกรงขั้วแคโทดก็ทำด้วยวัสดุเดียวกันกับตะแกรงที่รองรับ ความสูงของเบด 1.5 ซม. ระยะห่างของผิวเบดถึงขั้วแคโทด 3 ซม.
- 3) ทำการติดตั้งและต่อเชื่อมระบบเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบโดยมีการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ไว้ที่ 7 แอมแปร์ และใช้สารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นคงที่ 10 กรัมต่อลิตร ความดันลม 1.5-2.5 บาร์ ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 4 ชั่วโมง
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างที่อัตราเจือจางเริ่มต้น 10 เท่า 100 มิลลิลิตร และน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทุกๆ 1 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง
- 5) นำไปวิเคราะห์ค่าสมบัติต่างๆ

3.6.6) ศึกษารูปแบบการทำงานร่วมกันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และการตกตะกอน

ได้ทำการเปรียบเทียบ 2 รูปแบบ ได้แก่ การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE (Pretreatment process) และการบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE (Posttreatment process)

3.6.6ก) การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE หมายถึง การบำบัดด้วยเทคนิคสารช่วยตกตะกอนก่อนผ่านเทคนิคเคมีไฟฟ้า ซึ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE และการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE

วิธีการทดลอง

- 1) น้ำกากส่าที่อัตราเจือจาง 10 เท่า มีค่าความเป็นกรด-เบส 4.77 ถูกผสมกับสารตกตะกอนอะลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร ในถังตกตะกอนเรียบร้อยแล้ว ต่อมาทำการแยกตะกอนออกด้วยการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 หลังจากนั้นน้ำกากส่าที่ผ่านการกรองแล้วในถังพักจะถูกปั๊มไปยังเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ปริมาณ 8 ลิตร
- 2) บรรจุมัดขั้วไฟฟ้าลงในเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ซึ่งมัดขั้วไฟฟ้าเป็นมัดแกรไฟต์ น้ำหนักที่ใช้ 500 กรัม โดยประมาณ ความสูงของเบด 1.5 ซม. ระยะห่างของผิวเบดถึงขั้วแคโทด 3 ซม. ความดันลม 1.5-2.5 บาร์
- 3) ทำการติดตั้งและต่อเชื่อมระบบเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ ระบบ โดยมีการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ไว้ที่ 7 แอมแปร์ และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นคงที่ 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 4 ชั่วโมง
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างน้ำที่อัตราเจือจาง 10 เท่า 100 มิลลิลิตร ตามด้วยน้ำที่ผ่านการตกตะกอน 100 มิลลิลิตร และน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทุกๆ 1 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง
- 5) นำไปวิเคราะห์ค่าสมบัติต่างๆ

3.6.6ข) การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE หมายถึง การบำบัดด้วยเทคนิคสารช่วยตกตะกอนภายหลังจากผ่านเทคนิคเคมีไฟฟ้า

วิธีการทดลอง

- 1) บรรจุมะเด็ทซ์ไฟฟ้าลงในเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ซึ่งเม็ดซ์ไฟฟ้าเป็นเม็ดแกรไฟต์ น้ำหนักที่ใช้ 500 กรัม โดยประมาณ
- 2) นำกากสำที่อัตราเจือจาง 10 เท่า ถูกบีบเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ปริมาณ 8 ลิตร ซึ่งทำการติดตั้งและต่อเชื่อมเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่อง โดยมีการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 แอมแปร์ และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นคงที่ 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 4 ชั่วโมง
- 3) หลังจากนั้นน้ำที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ 3PE จะไหลเข้าถังตกตะกอนเป็นถังผสมที่มีใบพัดกวน โดยนำตัวอย่างนี้จะถูกผสมด้วยสารตกตะกอนอะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร สุดท้ายนี้ น้ำที่ผ่านเครื่องตกตะกอนมาแล้วจะถูกกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างเริ่มต้นที่อัตราการเจือจาง 10 เท่า 100 มิลลิลิตร ตามด้วยน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทุกๆ 1 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง และน้ำสุดท้ายที่ผ่านการตกตะกอน 100 มิลลิลิตร
- 5) นำไปวิเคราะห์ค่าสมบัติต่างๆ

3.6.7) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองซ้ำหัวข้อ 3.6.6ก
- 2) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 1-10 กรัมต่อลิตร และเวลาการทดลองเพิ่มขึ้นจาก 4 ชั่วโมง เป็น 6 ชั่วโมง

3.6.8) ศึกษาผลกระทบของความเข้มของกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองซ้ำหัวข้อ 3.6.7
- 2) โดยใช้ความเข้มของกระแสไฟฟ้า 4-10 แอมแปร์

3.6.9) ศึกษาและหาสมการจลนพลศาสตร์ (Kinetics equation)

วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองซ้ำหัวข้อ 3.6.8
- 2) โดยนำภาวะการทดลองที่ดีที่สุดทั้งความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์และความเข้มข้นกระแสไฟฟ้ามาใช้
- 3) ทำการทดลองโดยการควบคุมอุณหภูมิของระบบ 3 ค่า คือ 31.5 39 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตอนที่ 3 ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง

3.6.9) ศึกษาอัตราการไหลที่ดีที่สุดและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ (Steady state)

วิธีการทดลอง

3.6.9ก) อัตราการไหลที่เหมาะสม

- 1) บรรจุเม็ดข้าวโพดลงไปเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ซึ่งเม็ดข้าวโพดเป็นเม็ดแกรไฟต์ น้ำหนักที่ใช้ 1000 กรัม โดยประมาณ
- 2) นำกากส่าที่อัตราเจือจาง 10 เท่า ที่ผสมกับสารตกตะกอนอะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร เรียบร้อยแล้ว จึงถูกบีบเข้าไปในถังผสมที่มีใบพัด กวน ต่อมาน้ำตัวอย่างได้ถูกส่งไปยังถังพักตะกอนเพื่อให้เกิดการตกตะกอน สุดท้ายน้ำที่ล้นออกจากถังพักตะกอนก็ถูกบีบโดยผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ในช่วงระหว่าง 0.5-1.5 ไปยังเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ทำการติดตั้งและต่อเชื่อมระบบเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ไว้ที่ 10 แอมแปร์ และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 6 ชั่วโมง
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างเริ่มต้นที่อัตราการเจือจาง 10 เท่า 100 มิลลิลิตร ตามด้วยน้ำที่ผ่านการตกตะกอน 100 มิลลิลิตร และน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทุกๆ 1 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง
- 5) นำไปวิเคราะห์ค่าสมบัติต่างๆ

วิธีการทดลอง

3.6.9ข) เวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่

- 1) ทำการทดลองซ้ำหัวข้อ 3.6.9ก
- 2) โดยเวลาการทดลองเพิ่มขึ้นจาก 6 ชั่วโมง เป็น 12 ชั่วโมง

3.6.10) ศึกษาผลกระทบจากการป้อนย้อนกลับและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่

วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองซ้ำหัวข้อ 3.6.9ข
- 2) เมื่อเวลาการทดลองถึงชั่วโมงที่ 11 จึงเริ่มกระบวนการไหลย้อนกลับเป็นเวลาทั้งหมด 9 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุกๆ ชั่วโมงของการป้อนย้อนกลับ กำหนดให้น้ำที่ป้อนย้อนกลับมีอัตราการไหลเป็น 0.45 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 90 ส่วนน้ำที่ไหลเข้ามาในระบบและออกนอกระบบมีอัตราการไหลเท่ากัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.05 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

การบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำกากสำนี้ ได้ทำการศึกษาโดยอาศัยทฤษฎีของเคมีไฟฟ้า ฟลูอิดไดเซชัน และการตกตะกอนด้วยสารช่วยตกตะกอน โดยผ่านทางเครื่อง 3PE กับ การตกตะกอน ซึ่งเครื่อง 3PE นี้มีหลักการทำงานร่วมกันของทฤษฎีเคมีไฟฟ้ากับฟลูอิดไดเซชัน ส่วนถึงตกตะกอนมีหลักการทำงานพื้นฐานมาจากการตกตะกอนด้วยสารเคมี การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรานี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน คือ สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากสำ ระบบปฏิบัติการแบบกะ ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง และต้นทุนการบำบัด

4.1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากสำ

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

4.1.1) การวิเคราะห์หาค่าสมบัติของน้ำกากสำ

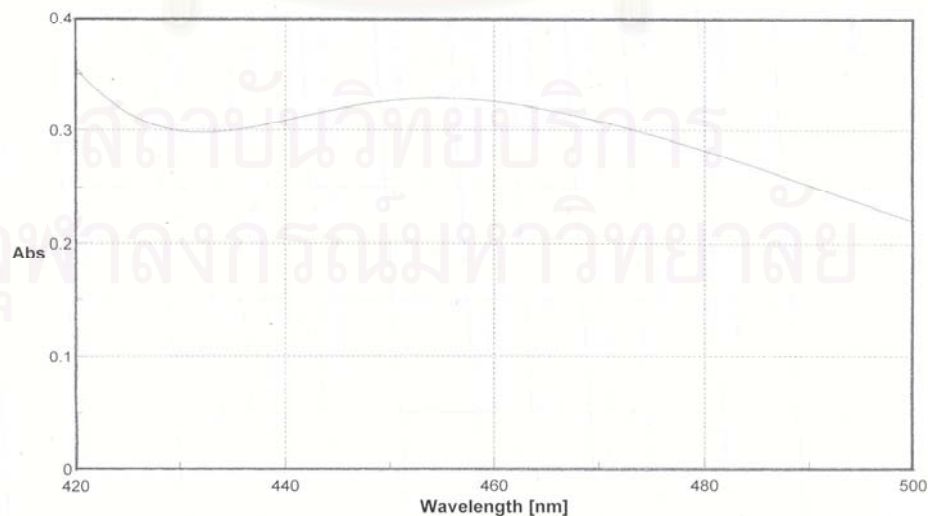
ก่อนทำการทดลอง ได้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำกากสำดังกล่าว เปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม สมบัติต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำกากสำ พบว่าน้ำกากสำมีสีน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นคล้ายชีอิ้ว และมีตะกอนมาก น้ำกากสำมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์ ได้แก่ ซีไอดี และบีไอดี ซึ่งซีไอดีมีค่าในช่วง 65,600-143,462 มิลลิกรัมต่อลิตร บีไอดีมีค่าในช่วง 15,750-88,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเหล่านี้เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของน้ำเสียโดยทั่วไป เห็นได้ว่า มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานมาก นอกจากนี้สีของน้ำกากสำที่วัดได้มีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน คือมีค่าในช่วง 103,270 – 115,100 หน่วยสีของแพลทินัม-โคบอลต์ แม้ไม่มีค่ามาตรฐานของสีในน้ำเสีย แต่มีข้อกำหนดว่าสีของน้ำเสียต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ขณะที่ค่าของแข็งต่างๆ ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ และของแข็งทั้งหมดจัดว่าไม่ผ่านเกณฑ์การบำบัด โดยของแข็งแขวนลอยมีค่าในช่วง 2,475-6,080 มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งละลายน้ำ 80,550-110,367 มิลลิกรัมต่อลิตร และของแข็งทั้งหมด 83,900-115,267 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้นน้ำเสียจากโรงงานสุรา จึงต้องผ่านการบำบัดก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติเพื่อให้เกิดผลกระทบต่อคนน้อยสุด

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำกากส่าจากโรงงานสุรา

พารามิเตอร์	ปริมาณ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง
ค่าความเป็นกรด – เบส	4.54-4.84	5.5-9
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	53 – 100	≤ 40
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	16.04-23.4	ไม่ได้กำหนด
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80,550-110,367	≤ 3,000
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,475-6,080	≤ 150
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	83,900-115,267	ไม่ได้กำหนด
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	65,600-143,462	≤ 400
ค่าบีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	15,750-88,500	< 60
สี (หน่วยของแพลทินัม – โคบอลต์)	103,270 – 115,100	ไม่พึงรังเกียจ

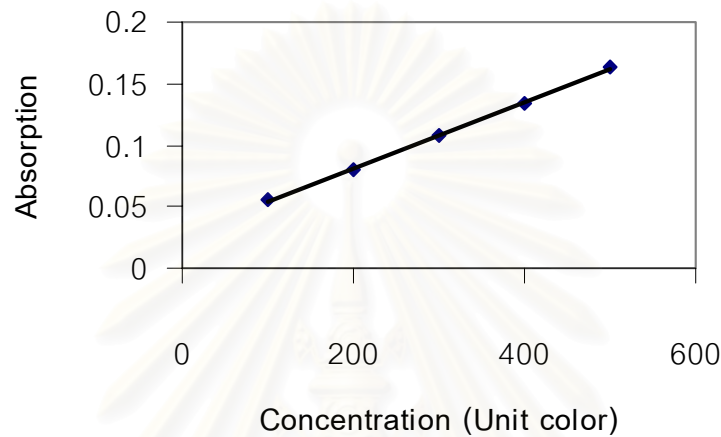
4.1.2) การหาความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงของน้ำกากส่าโดยเครื่อง UV spectrophotometer

รูปที่ 4.1 เป็นกราฟของ Spectrum measurement แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสง พบว่า น้ำกากส่าสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด ณ ความยาวคลื่น 456 นาโนเมตร เหตุที่เลือกความยาวคลื่นนี้มาใช้เพราะเมื่อเพิ่มน้ำหนักของสารโพแทสเซียมคลอโรแพลทีเนตซึ่งเป็นสารที่ให้สีใกล้เคียงกับสีน้ำกากส่าแล้วค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 456 นาโนเมตร สูงขึ้นตามสัดส่วนของน้ำหนักที่ให้ไป



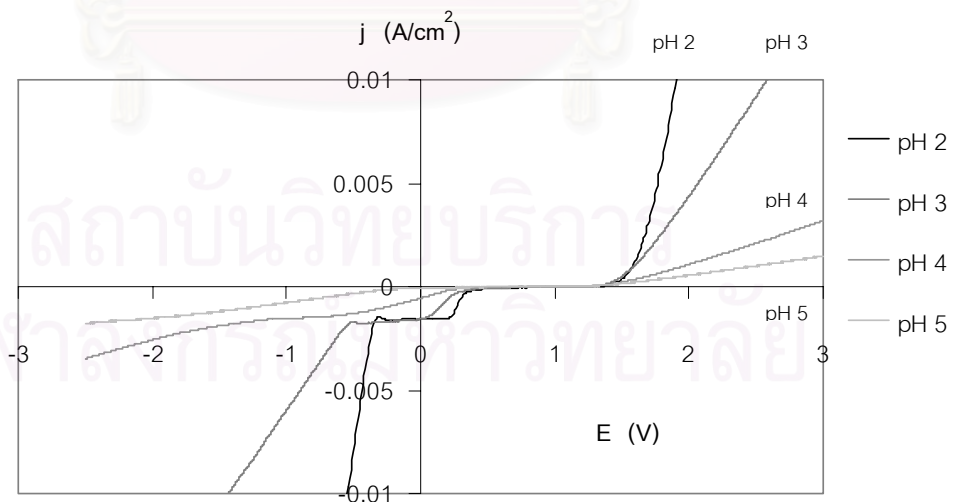
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสง

รูปที่ 4.2 เป็นกราฟของ Quantitative analysis แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีกับค่าการดูดกลืนแสง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีกับค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกากส่าเพื่อใช้เป็นมาตรฐานและเป็นตัวเทียบสีน้ำกากส่าที่ไม่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ซึ่งพบว่าความเข้มของสีเป็นฟังก์ชันอยู่กับค่าการดูดกลืนของแสง ($\text{Conc.} = f(\text{abs})$) สมการที่ได้จากการทดลองคือ $\text{abs} = 0.0003(\text{conc.}) + 0.027$, $R^2 = 0.9996$



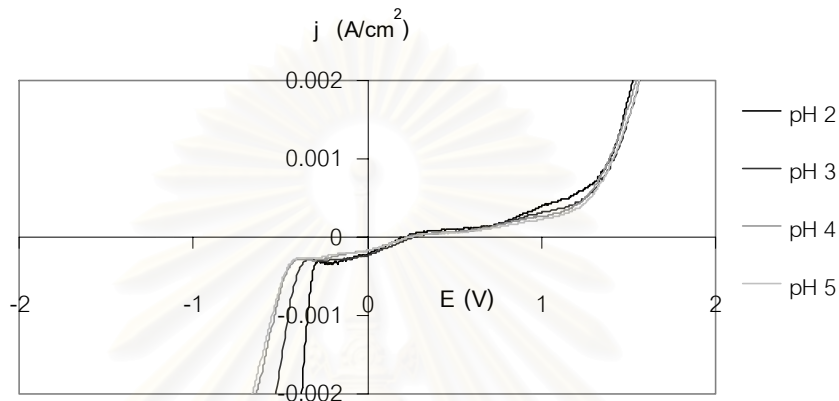
รูปที่ 4.2 กราฟ Quantitative analysis

4.1.3) การทดสอบการเกิดออกซิเดชันของน้ำกากส่าในเครื่อง Potentiostat/Galvanostat)



รูปที่ 4.3 กราฟโพลาริเซชันของน้ำกากส่าที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ

รูปที่ 4.3 เป็นกราฟโพลาริเซชันของน้ำกลั่น ได้ทำการศึกษาที่ค่าความแตกต่างของความเป็นกรด-เบสต่างๆ ได้แก่ 2 3 4 และ 5 พบว่า น้ำกลั่นที่ทุกค่าของความเป็นกรด-เบสให้กระแสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเริ่มมีขึ้นที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.4 V เนื่องจากน้ำกลั่นที่อัตราเจือจาง 10 เท่า มีน้ำกลั่นเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย ดังนั้นการเกิดกระแสออกซิเดชันของน้ำกลั่นที่อัตราเจือจางที่เกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 1.4 โวลต์ นั้นจะถือว่าเป็นกระแสไฟฟ้าออกซิเดชันของน้ำกลั่นในน้ำกลั่น



รูปที่ 4.4 กราฟโพลาริเซชันของน้ำกลั่นที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ

รูปที่ 4.4 เป็นกราฟโพลาริเซชันของน้ำกลั่นที่อัตราเจือจาง 10 เท่า ได้ทำการศึกษาที่ค่าความแตกต่างของความเป็นกรด-เบสต่างๆ ได้แก่ 2 3 4 และ 5 พบว่า ทุกค่าของความเป็นกรด-เบสที่กล่าวมาข้างต้น จะเริ่มเกิดกระแสไฟฟ้าออกซิเดชันของน้ำกลั่นที่ค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.25 โวลต์ เป็นต้นไป ที่น่าสนใจคือ น้ำกลั่น ณ ระดับความต่างศักย์ 0.8 โวลต์ โดยเฉพาะที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 เกิดกระแสไฟฟ้าออกซิเดชันสูงกว่าน้ำกลั่นที่ความเป็นกรด-เบสอื่นๆ โดยที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามืดค่าโดยประมาณ 0.0045 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงว่าความเป็นกรด-เบสมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของระบบ โดยพบว่าที่ความเป็นกรด-เบสต่ำ ใ้การเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าที่ความเป็นกรด-เบสสูง เพราะเนื่องจากมีปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) อยู่ในระบบมากทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่มาก ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่างๆ เช่น น้ำ หรือสารอินทรีย์ไปยังขั้วแอโนดเพื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นไปได้ดี ขณะเดียวกัน การที่มีปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) มากทำให้การเกิดปฏิกิริยารีดักชันมากด้วยเช่นกัน

4.2 ระบบปฏิบัติการแบบกะ

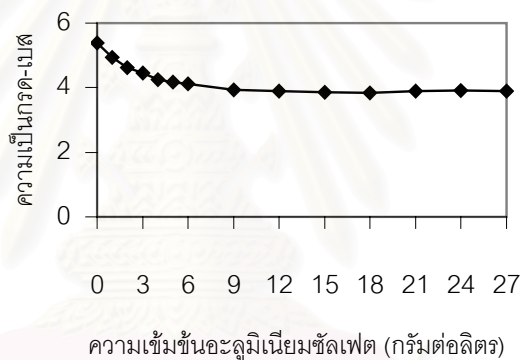
4.2.1) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารตกตะกอนในถังตกตะกอน ได้ศึกษาผลของสารช่วยตกตะกอนที่มีต่อการลดลงของสีและสารอินทรีย์ในน้ำกลั่น สารช่วยตก

ตะกอนที่ใช้คือ อะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ช่วงความเข้มข้นที่ใช้ทำการทดลองอยู่ระหว่าง 0 ถึง 27 กรัมต่อลิตร

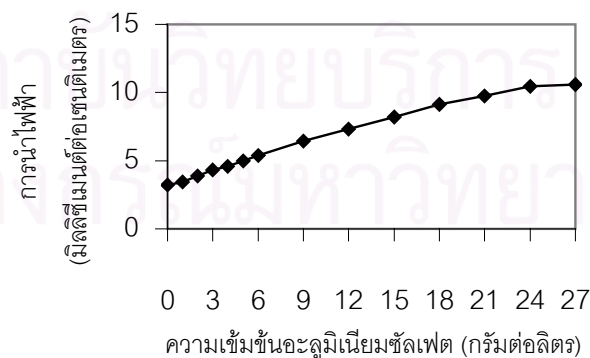
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-เบสกับเวลา พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตมากขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดกลไกของกระบวนการจับก้อน โดยการแตกตัวของอะลูมิเนียมซัลเฟตแสดงในสมการที่ 4.1



อะลูมิเนียมซัลเฟตเกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในสารละลายได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนรูปแบบต่างๆ ซึ่งโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบสในน้ำเสีย และโครงสร้างที่มีความเสถียรคืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ การละลายของอะลูมิเนียมซัลเฟตนี้ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำกากส่าลดลง เนื่องจากการลดลงของไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์

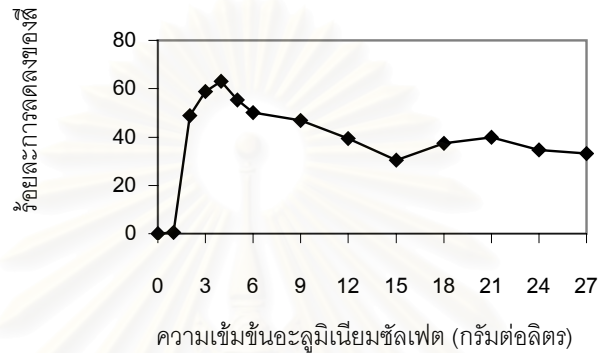


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-เบสกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต



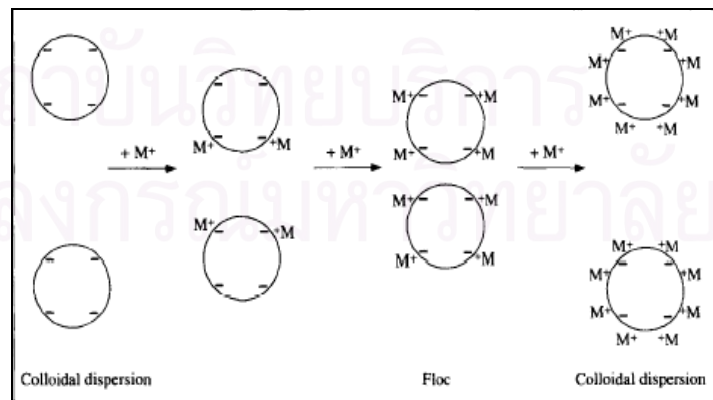
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่าการนำไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับไอออนที่มีประจุบวกและลบ ถ้าในสารละลายมีปริมาณของไอออนมากการนำไฟฟ้าก็มากด้วยเช่นกัน เมื่อเติมอะลูมิเนียมซัลเฟตซึ่งจัดเป็นเกลือซัลเฟตชนิดหนึ่งลงไปทำให้เกิดการแตกตัวของอะลูมิเนียมซัลเฟตได้เป็นอะลูมิเนียมไอออน และซัลเฟตไอออน จึงเสมือนเป็นการเพิ่มไอออนลงไปในน้ำกาฬสา ดังนั้นการนำไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่า สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ ช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 4 กรัมต่อลิตร สารเมลาโนยดินซึ่งมีประจุลบถูกดูลประจุให้เป็นกลาง (Charge neutralization) ด้วยไอออนเชิงซ้อนที่มีประจุบวกโดยการจับกันจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าของประจุที่แตกต่างกันดึงดูดเข้าไป ซึ่งลักษณะของการจับกันแสดงดังรูปที่ 4.8 (Migo, 1997)

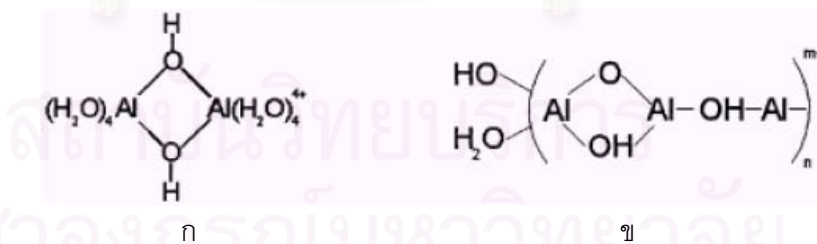


รูปที่ 4.8 กลไกการรวมตัวกันของสารเมลาโนยดินกับสารช่วยตกตะกอน

ขณะเดียวกันก็จะเกิดแรงผลักในตัวคล้ายๆกับการศึกษาระยะห่างของนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนในอะตอมจนกระทั่งได้ระยะห่างที่พอดีระหว่างแรงดูดกับแรงผลักกัน เรียกว่าระยะสมดุล ซึ่งการล้อมรอบสารเมลานอยดินเป็นชั้นๆ (Double layer) แต่ละชั้นจะมีความหนาแน่นของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ต่างกันไปโดยชั้นที่ใกล้กับสารเมลานอยดินจะหนาแน่นที่สุด และลดหลั่นไปตามระยะห่างที่มากขึ้น จากนั้นอนุภาคค่อยๆใหญ่ขึ้นเนื่องจากอนุภาคที่เป็นกลางสามารถจับกับอนุภาคที่เป็นกลางมากมายได้ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักมากขึ้นจึงตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Cohen, 1971 และ O'Melia, 1972)

จากการทดลอง อธิบายได้ว่า การเติมสารช่วยตกตะกอน คือ อะลูมิเนียมซัลเฟตระหว่าง 0 ถึง 4 กรัมต่อลิตร ลงไปทำให้แตกตัวเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al^{3+}) และซัลเฟตไฮดรอกไซด์ (SO_4^{2-}) แสดงในสมการที่ 4.1 กลุ่มไฮดรอกไซด์ประจุบวกที่เข้ามาจับกับสารเมลานอยดินประจุลบนี้ อาจเป็นกลุ่มไฮดรอกไซด์เชิงซ้อนของอะลูมิเนียม ที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes โดยกลุ่มไฮดรอกไซด์เชิงซ้อนของอะลูมิเนียมเหล่านี้เกิดจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายรวมตัวกับ Polyhydroxides เกิดเป็นโครงสร้างต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบส เช่น Monomeric, Dimeric และ Polymeric เป็นต้น

ตัวอย่างโครงสร้างของ Monomeric ได้แก่ $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ เป็นต้น ส่วนโครงสร้างของ Dimeric ได้แก่ $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ และโครงสร้างของ Polymeric ได้แก่ $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ และ $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ เป็นต้น โดยโครงสร้างของ Dimeric และ Polymeric aluminum (III) hydroxo complexes แสดงดังรูปที่ 4.9 (Mollah, 2001)



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes

(ก) Dimeric Al^{3+} hydroxo complexes

(ข) Polymeric Al^{3+} hydroxo complexes

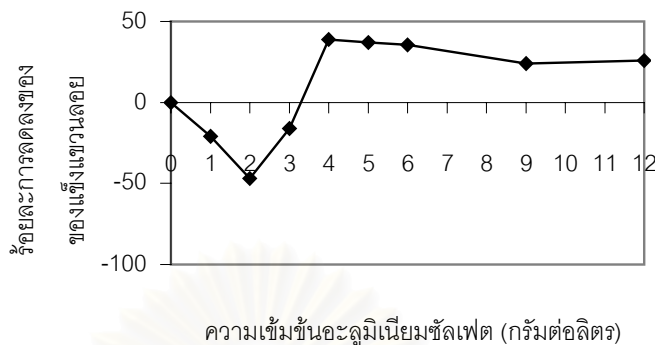
ไอออนเชิงซ้อนนี้เองได้ถูกดูดซับบนสารเมลานอยดินด้วยแรงทางไฟฟ้าและระยะห่างที่ไกลออกไปจากสารเมลานอยดินอิทธิพลของแรงทางไฟฟ้าจะน้อยลงการจับกันระหว่างกลุ่มอนุภาคที่เป็นกลางจะมีแรงอ่อนๆ คือแรงแวนเดอร์วาลส์ อธิบายได้ว่าอนุภาคที่เป็นกลางที่มีสารเมลานอยดินเป็นองค์ประกอบนี้จะจับกับอนุภาคที่เป็นกลางที่เกิดจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) จัดเป็นรูปแบบที่มีความเสถียรมากก่อนที่จะไปจับกันเกิดการตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลกลงมาได้ (Koby, 2003)

ส่วนความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตมากกว่า 4 กรัมต่อลิตร เกิดกระบวนการจับกันที่ไม่เสถียรหรือกล่าวได้ว่าการผลัดกันของประจุที่มากเกินไป ดังนั้นความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมที่สุดประมาณ 4 กรัมต่อลิตร ทำให้บำบัดสีได้ร้อยละ 63.1

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่าลักษณะของกราฟมีจุดสูงสุดเหมือนกับการลดลงของสี สามารถอธิบายได้เหมือนกัน โดยอาศัยกระบวนการของสารช่วยตกตะกอน (Cohen, 1971 และ O'Melia, 1972) ซึ่งถ้าใส่อะลูมิเนียมซัลเฟตมากเกินไปทำให้ไม่มีเสถียรภาพสำหรับการรวมตัวกันของกลุ่มอนุภาค (Destabilization) เนื่องจากอิทธิพลของแรงทางไฟฟ้าที่มีมากเกินไป ก่อให้เกิดการผลัดกันของประจุหรือกล่าวได้ว่าเสียสมดุลไป ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมที่สุดประมาณ 4 กรัมต่อลิตร สามารถบำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 10.1 ส่วนค่าบีไอดีบำบัดได้น้อยมาก



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต



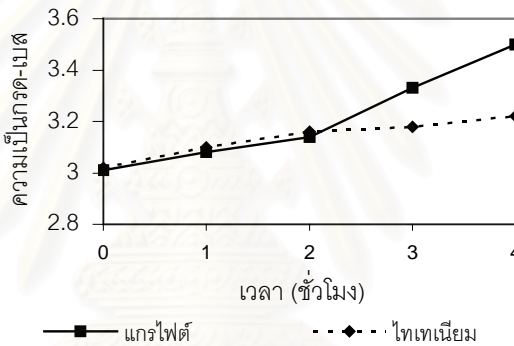
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่าทุกครั้งที่ทำการผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วจะต้องกรองตะกอนหนักออกจากน้ำตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 ก่อนไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C เพื่อหาของแข็งแขวนลอย จากผลการทดลอง เห็นได้ว่าช่วงแรกของการเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต จาก 1-2 กรัมต่อลิตร ภาวะนี้มีความเข้มข้นต่ำตะกอนเกิดการรวมกันใหญ่ขึ้นและการจับตัวกันของตะกอนจับกันแบบไม่แข็งแรงและแน่นหนาพอหรือในขณะที่กรองอาจแตกออกเนื่องจากอิทธิพลของแรงภายนอก (การเท) จึงทำให้กระดาษกรองเบอร์ 1 ไม่สามารถดักจับอนุภาคที่มาจากน้ำตัวอย่างได้ จึงลอดผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ไปแต่เมื่อกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C กลับมีตะกอนบน GF/C มาก การที่ตะกอนไม่สามารถผ่านกระดาษกรอง GF/C แสดงว่ามีของแข็งแขวนลอยมาก ดังนั้นร้อยละของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อเพิ่มจาก 2-4 กรัมต่อลิตร พบว่าตะกอนถูกกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 มากขึ้น น้ำตัวอย่างจึงมีตะกอนลดลง ดังนั้นเมื่อกรองด้วยกระดาษ GF/C จึงพบตะกอนบนกระดาษน้อยลง แสดงว่าของแข็งแขวนลอยลดลง ที่ระดับความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต 4 กรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดทำให้การลดลงของของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดคือร้อยละ 39 แต่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตมากกว่า 4 กรัมต่อลิตร ผลที่เกิดขึ้นคือตะกอนไม่เสถียร ซึ่งสามารถอธิบายได้เหมือนกับการลดลงของสี และซีไอดี ส่วนของแข็งละลาย พบว่าไม่สามารถลดลงด้วยวิธีการเติมสารเคมี เพราะการเติมสารเคมีทำให้ค่าของแข็งละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ในสารละลายมากขึ้นนั่นเอง

ในการศึกษาความเข้มข้นของสารตกตะกอนในถังตกตะกอน สรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต 4 กรัมต่อลิตร ทำให้ลดค่าการวิเคราะห์ทางน้ำเสียได้ดี ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต 4 กรัมต่อลิตร จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาต่อไป

4.2.2) ศึกษาชนิดของเม็ดชีวไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ชีวอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบชนิดของเม็ดชีวไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีและสารอินทรีย์ เม็ดชีวไฟฟ้าที่นำมาใช้ ได้แก่ เม็ดไทเทเนียม และเม็ดแกรไฟต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด อย่างละ 500 กรัม ตัวแปรที่ควบคุมได้แก่ ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร และปริมาณของน้ำกากส่าเจือจาง 10 เท่า จำนวน 8 ลิตร



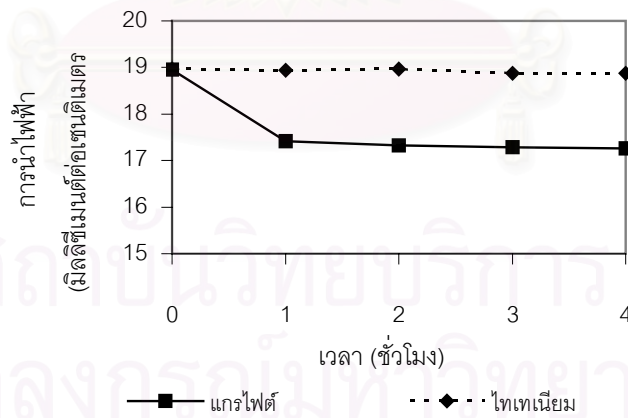
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลา

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลา ซึ่งในการทดลองต้องทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสเป็น 3 ด้วยกรดซัลฟูริกเพราะจากผลการทดลอง Cyclic voltametry การเกิดออกซิเดชันของน้ำกากส่าจะให้ผลดีที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ และที่ภาวะความเป็นกรด-เบสต่ำนี้ทำให้มีไฮโดรเจนไอออนมากกว่าภาวะปกติ ส่งผลให้เห็นความแตกต่างของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่ชัดเจนขึ้นสำหรับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ผลการทดลองในรูปที่ 4.12 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะผลจากการปรับค่าความเป็นกรด-เบสในน้ำกากส่าทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากกว่าการเคลื่อนที่ไปที่เม็ดชีวไฟฟ้าโดยการแพร่ ไมเกรชัน และการพาเพื่อไปเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นแก๊สไฮโดรเจนย่อมเกิดขึ้นได้ง่าย ส่วนผลของออกซิเดชันทางอ้อมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ (ดังสมการที่ 4.6) ทำให้ไฮโดรเจนไอออนลดลง 2 โมล แต่ก็ได้ไฮโดรเจนไอออนกลับ

มาอีก 2 โมล จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับแก๊สคลอรีน (ดังสมการที่ 4.7) ผลของการเพิ่มขึ้นของความเป็นกรด-เบสนี้ จะเห็นได้ว่า ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 เป็นต้นไป สำหรับเม็ดแกรไฟต์ให้ค่าความเป็นกรด-เบสสูงกว่าไทเทเนียม สันนิษฐานได้ว่าเม็ดแกรไฟต์มีจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ช้าแคโทดิกกว่าเม็ดไทเทเนียม เพราะความหนาแน่นที่ไม่เท่ากันช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน ซึ่งเม็ดแกรไฟต์มีความหนาแน่นน้อยกว่าเม็ดไทเทเนียม ดังนั้นจึงก่อให้เกิดข้อดี คือ

- เม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ
- มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง
- พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบตติ่ง

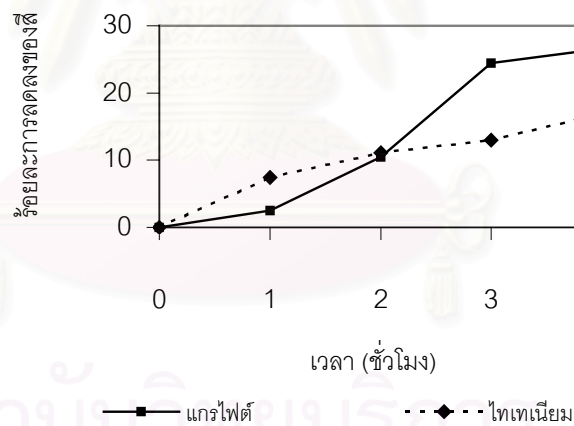
ดังนั้นทำให้การถ่ายโอนมวลของสารที่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างทั่วถึง พร้อมกันนี้เทคนิคฟลูอิดเซชันสามารถป้องกันการเกิดฟิล์มที่ผิวหน้าของเม็ดอิเล็กโทรดได้ เพราะการสั่นสะเทือนนี้ทำให้ฟิล์มมีขนาดลดลงมาก การขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดจึงลดลง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลา

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลา พบว่าน้ำกากส่าที่อัตราเจือจาง 10 เท่า มีค่าการนำไฟฟ้า 4.5 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ต้องทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยกรดซัลฟูริกเป็น 3 และเติมโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตรลงไป ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ

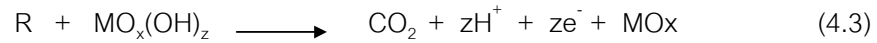
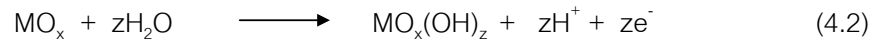
กากสาเริ่มต้้นก่อนผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 19 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เหตุที่ทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสและเติมโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตรลงไปเพราะต้องการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของระบบและเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนของผลการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์สำหรับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด หลังจากผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ทำให้ปริมาณไอออนในระบบลดลง สามารถอธิบายได้ว่าไอออนหายไปได้หลายกระบวนการ เช่น น้ำเคลื่อนที่ไปปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้ไฮโดรเจนไอออนหายไป (ดังสมการที่ 4.6) ส่วนคลอไรด์ไอออนหายไปจากการเคลื่อนที่ไปให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ดังสมการที่ 4.5) ขณะเดียวกันคลอไรด์ไอออนสามารถหายไปจากการออกซิไดส์สารอินทรีย์ เป็นต้น กลิ่นของแก๊สคลอรีนที่เกิดขึ้นนี้เองเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าไอออนมีการสูญหายไปมากกว่าปกติเพราะถ้าไม่มีกลิ่นไอออนทั้งหมดในระบบควรจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเนื่องจากจำนวนไอออนที่หายไป 4 โมล จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของคลอไรด์ไอออนและปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ (ดังสมการที่ 4.5 - 4.6) กับจำนวนไอออนที่เกิดขึ้น 4 โมล จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับแก๊สคลอรีน (ดังสมการที่ 4.7) ควรจะหักล้างกันไป ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดการสูญเสียไอออน การนำไฟฟ้าจึงลดลง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลา

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลา พบว่าร้อยละการลดลงของสีมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยเม็ดแกรไฟต์สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 27 ส่วนเม็ดไทเทเนียมสามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 17 ณ ชั่วโมงที่ 4 การลดลงของสีเกิดขึ้นจากออกซิเดชันของสารอินทรีย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม สำหรับโดยทางตรงนั้น เม็ดแกรไฟต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดจะมีโมเลกุลของน้ำเคลื่อนเข้ามาที่ผิวสัมผัสและถูกดูดซับที่เม็ดแกรไฟต์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (Hydroxy radicals) ซึ่งเกาะบนพื้นผิวของเม็ดแกรไฟต์นี้ ด้วยการที่เป็นอนุมูล

อิสระซึ่งไม่มีความเสถียรทำให้เกิดการออกซิไดส์สารอินทรีย์เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ดังสมการที่ 4.2-4.3



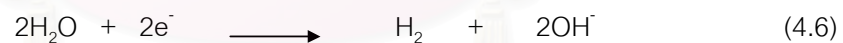
ส่วนทางอ้อมเป็นการเกิดออกซิเดชันโดยผ่านทางสารซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) คือ ไฮโปคลอไรท์ (OCI) และคลอไรต์ไฮออน (Cl⁻) ทำให้สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำจากสาลดลง เกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) กลไกการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดเป็นไปตามสมการที่ 4.4-4.8 (Manisankar, 2004) โดยเริ่มต้นจากโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่ลงไปใต้น้ำจากสาล้างเกิดการละลายและแตกตัว ได้ดังสมการ 4.4



การแตกตัวได้ให้โซเดียมไฮออนและคลอไรด์ไฮออน ต่อมาคลอไรด์ไฮออน สามารถเกิดการออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้เลย และคลอไรด์ไฮออนบางตัวทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์(ตัวให้อิเล็กตรอน) ไปเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดได้เป็นคลอรีนดังสมการที่ 4.5



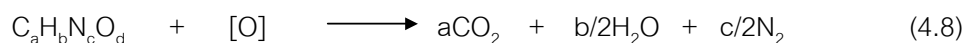
ส่วนน้ำทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ (ตัวรับอิเล็กตรอน) เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดได้เป็นแก๊สไฮโดรเจนดังสมการที่ 4.6

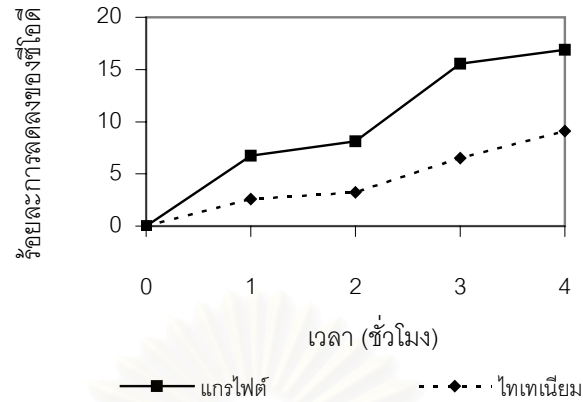


ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่ 4.5 และ สารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ 4.6 กล่าวคือ คลอรีนและน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง ได้เป็นดังสมการที่ 4.7



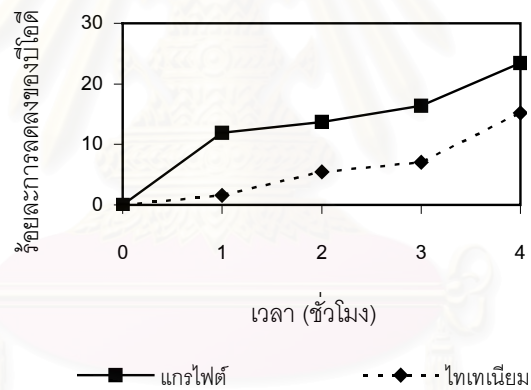
ซึ่งไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นเป็นสารออกซิไดส์ สามารถไปออกซิไดส์สารเมลานอยดินในน้ำจากสาล้างเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำดังสมการที่ 4.8





รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของซีโอดีกับเวลา

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีโอดีกับเวลา พบว่าร้อยละการลดลงของซีโอดีเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น ซึ่งเม็ดแกรไฟต์สามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 17 ส่วนเม็ดไทเทเนียมสามารถบำบัดได้ร้อยละ 9 ณ ชั่วโมงที่ 4

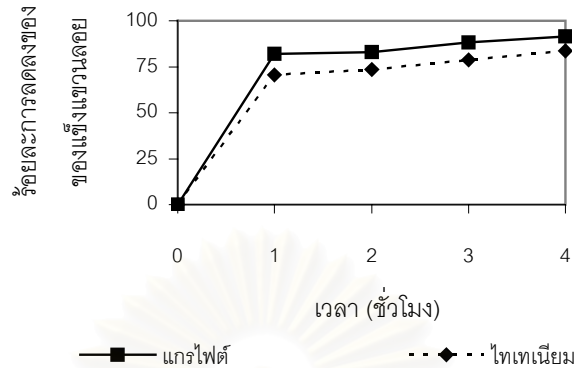


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลา

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลา พบว่าร้อยละการลดลงของบีโอดีเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น โดยเม็ดแกรไฟต์สามารถบำบัดได้ร้อยละ 23 ส่วนเม็ดไทเทเนียมสามารถบำบัดได้ร้อยละ 15 ณ ชั่วโมงที่ 4

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลา พบว่าร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น เห็นได้ว่าเม็ดแกรไฟต์สามารถบำบัดได้ร้อยละ 91 ส่วนเม็ดไทเทเนียมสามารถบำบัดได้ร้อยละ 84 ณ ชั่วโมงที่ 4 เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะของแข็งแขวนลอยในน้ำกากส่าเป็นสารจำพวกสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำกากส่าสามารถเกิดการทำลายด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าทำให้ของแข็งแขวนลอยหรือ

ตะกอนถูกกำจัดไป



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลา

นอกจากนี้ในส่วนการบำบัดของแข็งละลายโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ 3PE ปรากฏว่าสามารถบำบัดของแข็งละลายได้ไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้การเติมสารเคมีทั้งสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ลงไปทำให้เกิดปริมาณของแข็งละลายเพิ่มมากขึ้น จึงก่อให้เกิดปัญหามลภาวะหรือสร้างของเสียให้กับระบบอีก

จากผลการทดลองในส่วนของการศึกษาและเปรียบเทียบชนิดของเม็ดขั้วไฟฟ้า ได้ข้อสรุปว่าเม็ดแกรไฟต์ให้ผลการบำบัดที่ดีกว่าเม็ดไทเทเนียม และเมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่าเม็ดแกรไฟต์มีราคาถูกกว่าเม็ดไทเทเนียมประมาณ 100 เท่า ดังนั้นเม็ดแกรไฟต์จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาต่อไป

4.2.3) ศึกษารูปแบบการทำงานร่วมกันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และการตกตะกอน

ในการทำงานร่วมกันของเครื่อง 3PE และการตกตะกอนนี้ ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบ 2 แบบ คือ (โดยตัวแปรควบคุมเหมือนหัวข้อ 4.2.2 และที่เพิ่มเติมคือใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต 4 กรัมต่อลิตร กับสารก่อการจับกลุ่มที่มีประจุลบ 1 หยดต่อลิตร เป็นสารช่วยตกตะกอน)

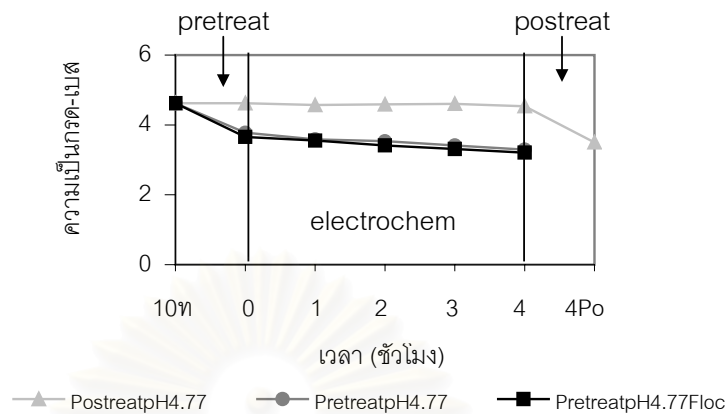
4.2.3.1) การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

ก) การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE

ข) การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE

4.2.3.2) การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่การทำงานต่างๆ

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่การทำงานต่างๆ พบว่า ทั้งการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE และการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE มีทิศทางไปในทางเดียวกัน คือ ความเป็นกรด-เบสมีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาหรือมีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่การทำงานต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE
	กระบวนการตกตะกอน		กระบวนการเคมีไฟฟ้า		กระบวนการเคมีไฟฟ้า
ความเป็นกรด-เบส	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต
	3.78	3.65	3.3	3.21	3.50

สามารถอธิบายได้เป็น 2 กระบวนการ คือ

1) การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE

1.1) ในขั้นตอนของการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อน พบว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนให้ค่าความเป็นกรด-เบสไม่แตกต่างจากการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่ม โดยน้ำกากส่ามีค่าความเป็นกรด-เบสลดลง

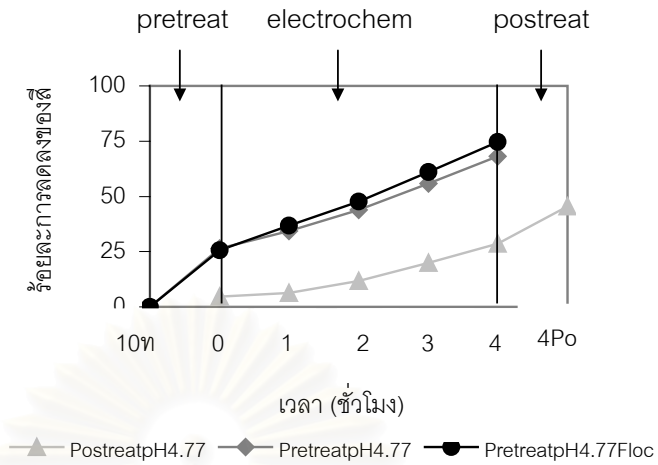
จากเริ่มต้น 4.77 มาเป็น 3.78 และ 3.65 ตามลำดับ การลดลงของความเป็นกรด-เบสนี้เกิดขึ้นมาจากกลไกของกระบวนการจับก้อนและกระบวนการจับกลุ่ม เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนเกี่ยวข้องกับกลไกการตกตะกอน โดยอะลูมิเนียมไอออนจะถูกดึงไปทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิเนียมขึ้น ซึ่งโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนและกลไกการตกตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบส ดังนั้นปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำกากส่าลดลงความเป็นกรดมากขึ้น

1.2) ในขั้นตอนของการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE นั้นเกิดขึ้นหลังจากการบำบัดด้วยการตกตะกอนเรียบร้อยแล้ว พบว่า การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสลดลงจาก 3.78 เป็น 3.3 ขณะที่การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ค่าความเป็นกรด-เบสลดลงจาก 3.65 มา 3.21 ผลที่ได้นี้สามารถอธิบายได้ว่า ไฮโดรเจนไอออนส่วนเกินมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง (ดังสมการที่ 4.2-4.3) ซึ่งน้ำเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลบนตัวรองรับเม็ดแกรไฟต์เกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนไอออน ต่อมาสารอินทรีย์จึงถูกออกซิไดส์ด้วยอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลบนตัวรองรับเม็ดแกรไฟต์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนไอออน และอื่นๆ เช่นกัน ดังนั้นไฮโดรเจนไอออนจึงเกิดขึ้นมาจากส่วนนี้ ขณะที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางอ้อมไม่ทำให้ไฮโดรเจนไอออนกับไฮดรอกไซด์ไอออนเปลี่ยนไป

2) การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE

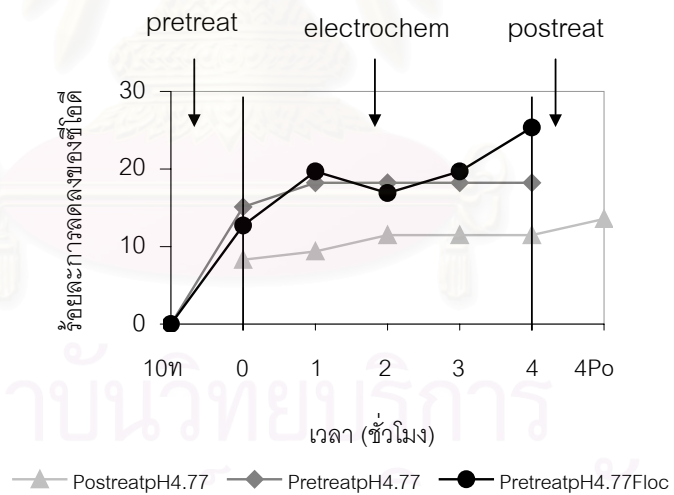
ในส่วนของการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE และตามด้วยการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่า ค่าความเป็นกรด-เบสลดลงจาก 4.62 มาเป็น 3.50 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสน้อยกว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE ทั้งนี้เนื่องจากน้ำกากส่าเจือจาง 10 เท่า มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นก่อนการบำบัดเป็น 4.62 การนำไฟฟ้าไม่มากนัก การเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นไม่ดีและการเกิดขึ้นเป็นไปอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับค่าความเป็นกรด-เบสที่ต่ำกว่า ซึ่งการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE มีปัจจัยสนับสนุนจากการตกตะกอนมาก่อน ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำมีไฮโดรเจนไอออนที่พร้อมไปเกิดปฏิกิริยารีดักชันอยู่แล้ว ประกอบกับเหตุผลทาง Cyclic voltametry ในหัวข้อที่ 4.1.3 ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความเป็นกรด-เบสต่ำระบบเกิดปฏิกิริยาได้ดี

รูปที่ 4.19 – 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลา ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ

หมายเหตุ 10th คือ อัตราเจือจางของน้ำกากส่า 10 เท่า



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการลดลงของสีกับเวลา (สุดท้าย) ที่การทำงานต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE
	กระบวนการตกตะกอน		กระบวนการเคมีไฟฟ้า		กระบวนการเคมีไฟฟ้า
สี	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต
	26	26	71	75	45

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลา (สุดท้าย) ที่การทำงานต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE
	กระบวนการตกตะกอน		กระบวนการเคมีไฟฟ้า		กระบวนการเคมีไฟฟ้า
ซีไอดี	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต
	15	13	18	25	14

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 อธิบายได้ว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลการบำบัดสีและซีไอดีได้ดีกว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE เมื่อพิจารณาเฉพาะการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE เห็นได้ว่ารูปแบบของการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลการลดลงของสีและซีไอดีมากที่สุดคือ ร้อยละ 75 และ 25 ตามลำดับ ลำดับขั้นตอนของแต่ละปฏิบัติการสามารถอธิบายได้เป็น 2 กระบวนการ คือ

1) การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE

1.1) ในขั้นตอนของการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อน พบว่าการผ่านกระบวนการตกตะกอนก่อนทำให้เกิดการบำบัดสีและสารอินทรีย์ การบำบัดเกิดขึ้นด้วยกลไกการตกตะกอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งว่าด้วยการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารตกตะกอนในเครื่องตกตะกอน ข้อดีของการตกตะกอนคือน้ำกากสามีค่าความเป็นกรด-เบสลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิบัติการออกซิเดชันเกิดขึ้นดีทั้งทางตรง

และทางอ้อม ซึ่งสารอินทรีย์และสีจึงถูกออกซิไดส์ไป ผลการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนสำหรับการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE บำบัดสีได้ร้อยละ 26 และบำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 15 ขณะที่การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE บำบัดสีได้ร้อยละ 26 และบำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 13 การที่รูปแบบของการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ค่าการบำบัดดีเพราะการเติมสารก่อการจับกลุ่มที่มีประจุลบลงไปมีผลต่อการรวมตัวของตะกอนเกิดเป็นกลุ่มตะกอนที่ใหญ่และมีน้ำหนักมาก หรือกล่าวได้ว่ากลุ่มตะกอนมีความเสถียรมาก

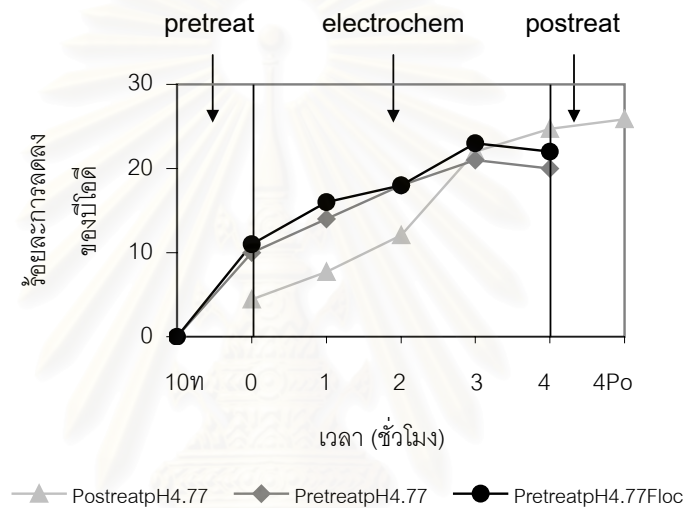
1.2) ในขั้นตอนของการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE พบว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE บำบัดสีได้ร้อยละ 71 และบำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 18 ขณะที่การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE บำบัดสีได้ร้อยละ 75 และบำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 25 ตามลำดับ ซึ่งลำดับขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาแสดงในหัวข้อที่ 4.2.2 สมการที่ 4.2-4.6 สารอินทรีย์ในน้ำกากส่าจึงถูกออกซิไดส์ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงและทางอ้อม ความแตกต่างของการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE ทั้ง 2 แบบนั้น พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเมื่อนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรม ควรพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุนด้วย เพราะยิ่งเติมสารเคมีมากต้นทุนการบำบัดก็จะสูง

2) การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE (Posttreatment process)

เป็นการบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังจากน้ำเสียได้ผ่านกระบวนการบำบัดเคมีไฟฟ้าแล้ว การที่น้ำกากส่าเข้าสู่การบำบัดทางเคมีไฟฟ้าก่อนทำให้จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่ดี เพราะน้ำกากส่าเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด-เบส 4.77 ปริมาณของไฮโดรเจนไอออนในน้ำกากส่าที่ไปเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดน้อย ผลที่เกิดขึ้นคือบำบัดสีและซีไอดีได้ร้อยละ 45 และ 14 ตามลำดับ

รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ พบว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE กับการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลการบำบัดที่ดีกว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE เมื่อพิจารณาการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE และการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลการ

บำบัดไม่แตกต่างกัน โดยผลการบำบัดเมื่อสิ้นสุดการทำงานเป็นไปตามตารางที่ 4.5 จากการทดลองพบว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE บำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 20 ส่วนการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE บำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 22 และการบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE บำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 25 เนื่องจากสารเมลานอยดินในน้ำกากสาเป็นสารอินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้มีความเกี่ยวข้องกับค่าบีโอดี แนวโน้มการลดลงของบีโอดีจึงสอดคล้องกับการลดลงของสีและซีโอดี



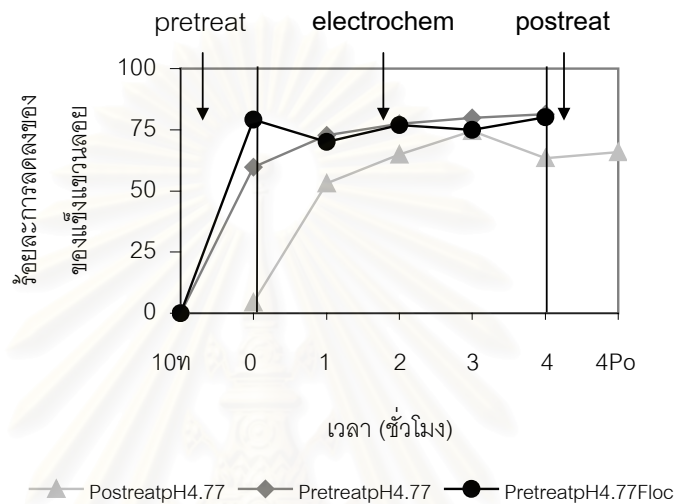
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลาที่การทำงานต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลา (สุดท้าย) ที่การทำงานต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE
	กระบวนการตกตะกอน		กระบวนการเคมีไฟฟ้า		กระบวนการเคมีไฟฟ้า
บีโอดี	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต
	8	10	20	22	25

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่รูปแบบการทำงานต่างๆ พบว่าผลการบำบัดเมื่อสิ้นสุดการทำงานแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า การ

บำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE กับการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลลัพธ์ของการบำบัดของแข็งแขวนลอยไม่ต่างกัน เมื่อนำผลการบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE เทียบกับของการบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE พบว่าแตกต่างกันเกือบร้อยละ 25 ณ ชั่วโมงที่ 4 และผลการบำบัดของแข็งละลาย พบว่าบำบัดได้น้อย คือไม่เกินร้อยละ 5



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่การทำงานต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลา (สุดท้าย) ที่การทำงานต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE		การบำบัดด้วยการตกตะกอนหลังผ่านเครื่อง 3PE
	กระบวนการตกตะกอน		กระบวนการเคมีไฟฟ้า		กระบวนการเคมีไฟฟ้า
ของแข็งแขวนลอย	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต	อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม	อะลูมิเนียมซัลเฟต
	60	76	81	80	66

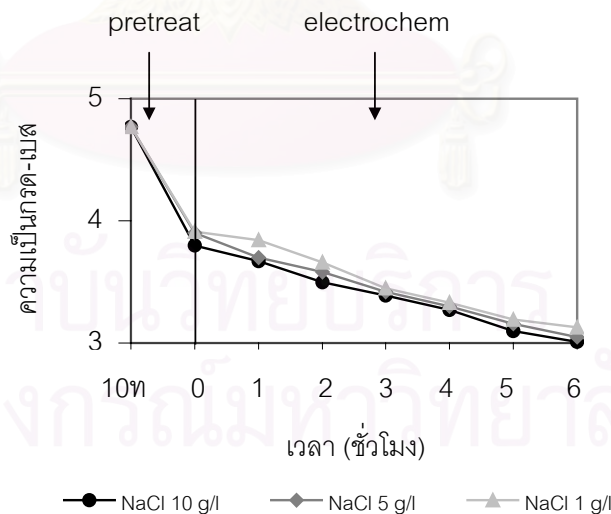
ผลการทดลองในส่วนของการศึกษาการทำงานแบบต่างๆ ได้ข้อสรุปโดยภาพรวมของการบำบัดว่า การทำงานแบบการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลการบำบัดที่ดีที่สุด เนื่องจากพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ทางน้ำเสียแล้วเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างจากการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัล

เฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE ซึ่งการลงทุนในภาคอุตสาหกรรมนั้น การเติมสารก่อการจับกลุ่มลงไปอาจจะไม่คุ้มค่า เพราะเป็นสารที่มีราคาแพงกว่าอะลูมิเนียมซัลเฟตมาก ทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ผลของการเติมสารก่อการจับกลุ่ม ลงไปทำให้การจับตัวกันของตะกอนเหนียวแน่นและมีประสิทธิภาพมากเปรียบเหมือนขนที่เข้าไปโอบตะกอนให้อยู่ร่วมกัน เป็นผลให้ตะกอนจะมีขนาดใหญ่และมีความเสถียร

4.2.4) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์

ในหัวข้อนี้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำเสียต่อค่าการลดลงของสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอย ในช่วง 1- 10 กรัมต่อลิตร ในการติดตั้งการทดลองนี้ได้นำผลสรุปจากภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมของหัวข้อที่ 4.2.1-4.2.3 คือ ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต 4 กรัมต่อลิตร เม็ดแกรไฟต์ และการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ขณะที่ตัวแปรที่ควบคุมไว้ให้คงที่เป็นไปตามหัวข้อที่ 4.2.3 เวลาที่ใช้ทำการทดลองทั้งหมดเพิ่มเป็น 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ พบว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสลดลงตามเวลา



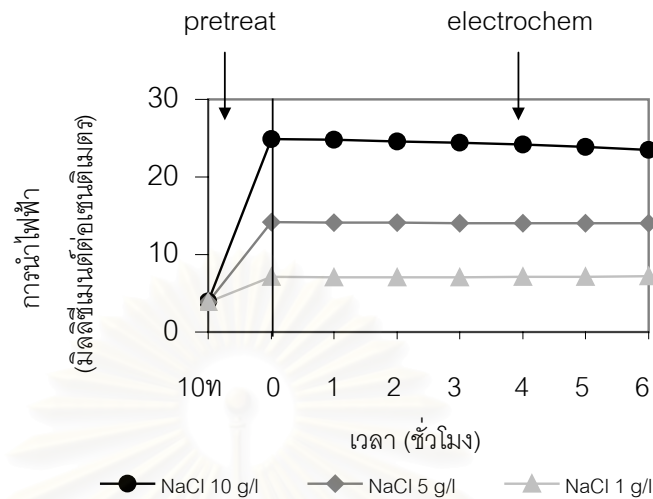
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

จากการทดลองเห็นได้ว่า สำหรับกระบวนการตกตะกอนที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตรให้ค่าความเป็นกรด-เบสลดลงมากที่สุดโดยเปลี่ยนจาก 4.77 เป็น 3.8 และเมื่อผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้าเปลี่ยนจาก 3.8 มาอยู่ที่ 3.01 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบทุกๆ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์พบว่าให้ผลการลดลงของความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเติมโซเดียมคลอไรด์เกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรด-เบส โดยค่าการนำไฟฟ้าของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของสารที่จะไปเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางตรงเกิดขึ้นได้ง่ายจึงเป็นสาเหตุให้ไฮโดรเจนไอออนมาก ซึ่งที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตรได้ไฮโดรเจนไอออนมากกว่าที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 1 และ 5 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ขณะที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางอ้อมไม่มีผลต่อการเกิดไฮโดรเจนไอออนดังที่ได้เคยกล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ พบว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อกำจัดกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE และการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ต่อมาเมื่อเข้าสู่กระบวนการเคมีไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าลดลงตามเวลา สำหรับผลการตกตะกอนด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อกำจัดกลุ่ม และการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนไปดังนี้

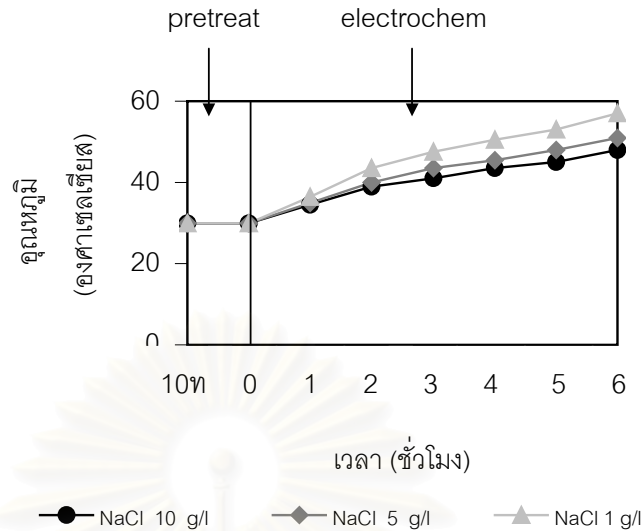
- ณ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร เปลี่ยนจาก 3.89 เป็น 7.14 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร
- ณ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร เปลี่ยนจาก 3.89 เป็น 14.16 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร
- ณ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร เปลี่ยนจาก 3.96 เป็น 24.9 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

ผลการทดลอง สามารถอธิบายได้ว่าช่วงแรกการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก 2 ปัจจัย คือ จากการเติมสารช่วยตกตะกอนอะลูมิเนียมซัลเฟตและการเติมโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยที่ได้กล่าวมานั้นทำให้เกิดการแตกตัวของสารในน้ำกาส่าได้ไอออนบวกและลบ การนำไฟฟ้าจึงมากขึ้นตาม ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด เพราะมีการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยความเข้มข้นมากกว่าตัวอย่างอื่นๆ เมื่อเข้าสู่กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งเป็นช่วงต่อจากกระบวนการตกตะกอน พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของทุกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เพราะไอออนในน้ำกาส่าหายไปจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน ขณะเดียวกันไอออนปริมาณไม่น้อยสามารถเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งทางตรงและทางอ้อมได้เช่นกัน



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ พบว่าทุกๆ ระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เมื่อผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้ว อุณหภูมิของระบบคงอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส โดยปกติเมื่อผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้าอุณหภูมิสูงขึ้นตามเวลาที่ทำการบำบัดและคงที่ในที่สุด สามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในรูปแบบต่างๆ กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานทางเคมี และบางส่วนของกระแสไฟฟ้าสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาต่างๆ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ฟิล์มขึ้น จึงเป็นสาเหตุของการขวางกั้นการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวเม็ดขั้วไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถส่งผ่านให้ไอออนบวกมารับได้ ดังนั้นการสะสมความร้อนของเม็ดขั้วไฟฟ้าจึงเกิดขึ้น นำมาซึ่งความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ (Temperature gradient) ที่ผิวเม็ดขั้วไฟฟ้ากับน้ำกากส่าที่ไหลออกไป เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน 2 จุด การถ่ายโอนความร้อนจึงเกิดขึ้นอุณหภูมิของน้ำกากส่ามีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของน้ำกากส่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ 3PE ได้นำเทคนิคฟลูอิดิเดชันมาประยุกต์ใช้ ซึ่งป้องกันการเกิดฟิล์มได้ จากการทดลองแสดงว่า ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพราะมีปริมาณไอออนในน้ำกากส่ามากทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวเม็ดขั้วไฟฟ้าได้ถ่ายเท ฉะนั้นการสะสมความร้อนจึงลดลง



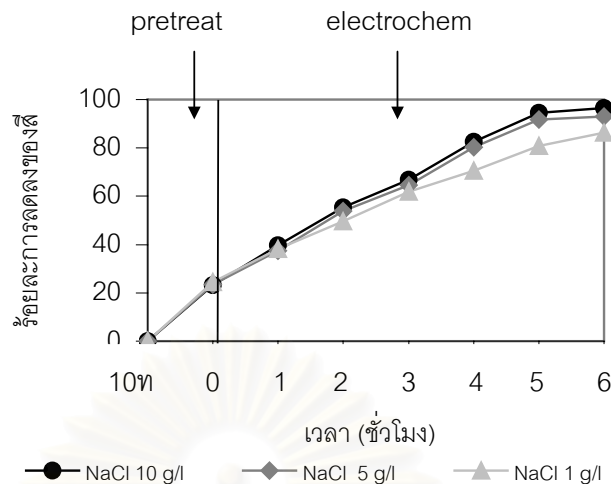
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ พบว่าทุกๆ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อร้อยละการลดลงของสีกับเวลา โดยการลดลงของสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และคงที่เมื่อเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยา ผลการบำบัดเมื่อสิ้นสุดการทำงานที่ 6 ชม. เป็นดังนี้

- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร บำบัดสีได้ร้อยละ 86
- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร บำบัดสีได้ร้อยละ 93
- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร บำบัดสีได้ร้อยละ 97

ผลการทดลอง พบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร ให้ร้อยละการลดลงของสีสูงสุดคือ 97 สามารถอธิบายลำดับการเปลี่ยนแปลงและผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์ได้โดยแยกออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

1) ช่วงแรกเป็นการผ่านกระบวนการตกตะกอน โดยการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่ม ผลที่เกิดขึ้นคือ เทคนิคการตกตะกอนทำให้บำบัดสีได้ร้อยละ 23-24 โดยมีกลไกการตกตะกอนเป็นไปตามการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2.1



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

2) ช่วงที่สองเป็นการผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้า ผลที่เกิดขึ้นคือ กระบวนการเคมีไฟฟ้าทำให้บำบัดสีได้ร้อยละ 97 สำหรับการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ซึ่งกลไกการกำจัดสีด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้านั้น ได้กล่าวไว้ดังหัวข้อที่ 4.2.2 สมการที่ 4.2-4.8 มาแล้ว สรุปโดยย่อคือ มีกระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อม ในกรณีที่กระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้นทางตรง เช่น คลอไรด์ไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไปสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำกากส่า หรือสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์ด้วยอนุมูลอิสระที่เมื่อดึงไฟฟ้าจนเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด เป็นต้น ในกรณีของกระบวนการออกซิเดชันทางอ้อมนั้นเกิดจากคลอไรด์ไฮดรอกไซด์มีประจุลบไปเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เม็ดแกรไฟต์ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดให้แก๊สคลอรีน โดยแก๊สนี้จะละลายในน้ำเปลี่ยนเป็นไฮโปคลอไรต์ ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์สามารถไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ในที่สุด จากเหตุผลในส่วนของ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางอ้อมนี้เห็นได้ว่าคลอไรด์ไฮดรอกไซด์เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งถ้ามีปริมาณคลอไรด์ไฮดรอกไซด์มากการนำไฟฟ้าก็จะดี โอกาสที่จะเกิดการออกซิเดชันทั้งทางตรงและทางอ้อมย่อมเกิดขึ้นได้ดีเช่นกัน

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ของลำดับการบำบัดสีกับเวลา ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ พบว่าลำดับการเปลี่ยนแปลงของสี เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชม. เห็นได้ว่าที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตรให้ค่าการลดลงของสีได้เด่นชัด โดยเฉพาะชั่วโมงที่ 4 เป็นต้นไป และที่ชั่วโมงที่ 6 ให้ค่าการบำบัดสีร้อยละ 97 ส่วนความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร บำบัดสีได้ร้อยละ 93 และความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร บำบัดสีได้ร้อยละ 86 ดังนั้นปริมาณโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อการบำบัดสี



รูปที่ 4.27 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่ความเข้มข้น
ของไซโตเคียมคลอไรด์ 1 5 10 กรัมต่อลิตร
เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

รูปที่ 4.28-4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีโอดีกับเวลา และการลดลงของบีโอดีกับเวลา ที่ความเข้มข้นของไซโตเคียมคลอไรด์ต่างๆ พบว่า ทุกๆ ความเข้มข้นของสารละลายไซโตเคียมคลอไรด์ ทำให้การบำบัดซีโอดีกับเวลา และการบำบัดบีโอดีกับเวลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาและคงที่เมื่อเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยา

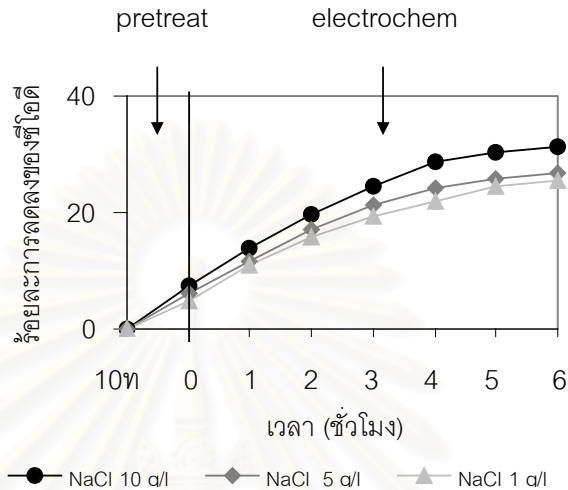
ผลการบำบัดซีโอดีเมื่อสิ้นสุดการทำงานที่ 6 ชม. เป็นดังนี้

- ณ ความเข้มข้นไซโตเคียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร บำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 26
- ณ ความเข้มข้นไซโตเคียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร บำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 27
- ณ ความเข้มข้นไซโตเคียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร บำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 31

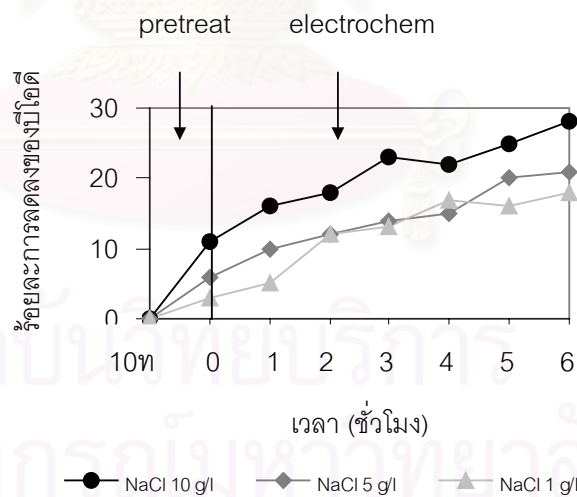
ผลการบำบัดบีโอดีเมื่อสิ้นสุดการทำงานที่ 6 ชม. เป็นดังนี้

- ณ ความเข้มข้นไซโตเคียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร บำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 18
- ณ ความเข้มข้นไซโตเคียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร บำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 21
- ณ ความเข้มข้นไซโตเคียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร บำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 28

จากการทดลอง พบว่าความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและบีไอดีได้ดีที่สุด โดยการทำงานของกระบวนการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่ม สามารถลดสารอินทรีย์และสีได้



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ พบว่า ร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นตามเวลา

ผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยเมื่อสิ้นสุดการทำงานที่ 6 ชม. เป็นดังนี้

- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร บำบัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 82
- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร บำบัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 89
- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร บำบัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 94

ผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยสามารถอธิบายโดยแยกเป็น 2 ช่วงได้ว่า

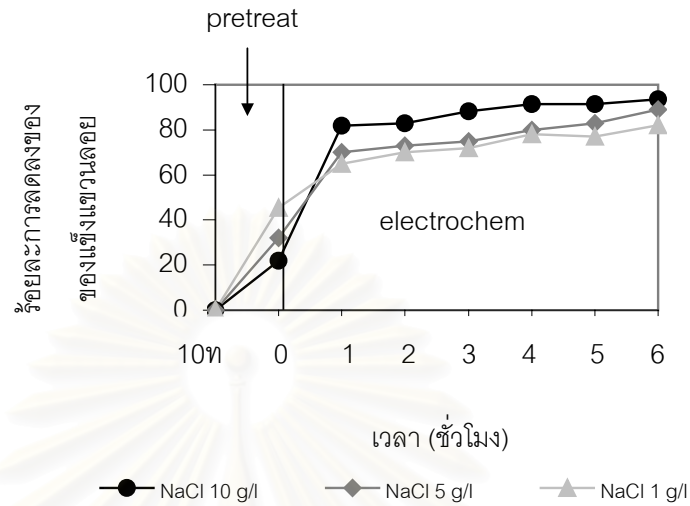
1) กระบวนการตกตะกอนด้วยถังตกตะกอน ผลการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนเป็นดังนี้

- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร บำบัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 45
- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร บำบัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 32
- ณ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร บำบัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 22

จากการทดลอง พบว่าที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร ถือว่าตะกอนแขวนลอยไม่เสถียร เนื่องจากการเติมโซเดียมคลอไรด์มากเกินไป ทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์และคลอไรด์ไฮดรอกไซด์มาขัดขวางการรวมตัวกันของสารอะลูมิเนียมซัลเฟตกับสารเมลานอยดินที่รวมตัวกันด้วยความเสถียรแต่ก่อนแล้ว ดังนั้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตร ให้ผลการบำบัดที่ดีกว่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 และ 10 กรัมต่อลิตร

2) ช่วงที่สอง จากผลการบำบัดด้วยเคมีไฟฟ้า ที่เวลา 1 ชั่วโมง อัตราการเปลี่ยนแปลงของการบำบัดสูงมาก หลังจากนั้นอัตราการบำบัดมีแนวโน้มลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล แสดงดังรูปที่ 4.30 เมื่อเปรียบเทียบทุกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพดี ซึ่งความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร ให้ผลการบำบัดที่ดีที่สุด กล่าวคือบำบัดได้ร้อยละ 94 การลดลงของของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นจากกระบวนการเคมีไฟฟ้า ทั้งนี้เป็นเพราะของแข็งแขวนลอยในน้ำกากส่าเป็นสารจำพวกสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำกากส่า สารเมลานอยดินจัดเป็นสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำกากส่า เมื่อมีปริมาณคลอไรด์ไฮดรอกไซด์มาก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งทางตรงและทาง

อ้อมได้มากเช่นกัน จึงนำไปสู่การทำลายเมลานอยดินหรือของแข็งแขวนลอยได้ ขนาดของแข็งแขวนลอยเปลี่ยนจากขนาดใหญ่มาเป็นขนาดเล็กลง และสลายตัวไปในที่สุด



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เมื่อกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

จึงสรุปได้ว่า โซเดียมคลอไรด์มีผลต่อการลดลงของค่าวิเคราะห์ทางน้ำเสีย เพราะโซเดียมคลอไรด์จัดเป็นสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นการที่มีคลอไรด์อยู่ในน้ำากสา่มากย่อมนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ซึ่งความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร ทำให้เกิดการลดลงของค่าวิเคราะห์ทางน้ำเสียดีที่สุด จึงนำมาประกอบการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

4.2.5) ศึกษาผลกระทบของความเข้มกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และเครื่องตกตะกอน

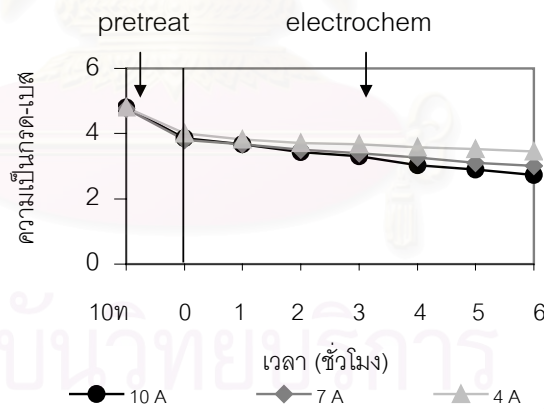
ในหัวข้อนี้ศึกษาผลของความเข้มกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และการตกตะกอนที่มีต่อค่าการลดลงสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยในน้ำากสา สืบเนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.4 ทำให้ได้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมคือ 10 กรัมต่อลิตร ในการทดลองนี้ทำการปรับค่าความเข้มกระแสไฟฟ้าที่ 4, 7 และ 10 แอมแปร์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่า การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่ม ทุกๆ ความแตกต่างของความเข้มกระแสไฟฟ้าให้ผลที่คล้ายกัน นั่นคือค่าความเป็นกรด-เบส

ลดลงเรื่อยๆ ตามเวลา ดังแสดงในตารางที่ 4.7 เห็นได้ว่าความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ให้ค่าการลดลงของความเป็นกรด-เบสมากที่สุด โดยกระบวนการตกตะกอนจะเปลี่ยนแปลงจาก 4.77 มาเป็น 3.85 และเมื่อผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้าได้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 3.85 มาอยู่ที่ 2.74 ดังนั้นความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับความเป็นกรด-เบส เพราะความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าสูงทำให้เกิดจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ผิวขั้วไฟฟ้าของไอออนยอมเกิดได้ง่ายกว่าความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่ำ ซึ่งสอดคล้องตามหลักการของฟาราเดย์ที่กล่าวไว้ว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณประจุที่ผ่านเข้าไปในระบบ นำมาซึ่งผลดีของการเกิดออกซิเดชันทั้งทางตรงและทางอ้อมสำหรับสารอินทรีย์ ออกซิเดชันโดยทางตรงทำให้ได้ไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น น้ำกากส่าจึงมีความเป็นกรด-เบสลดลง

ตารางที่ 4.7 ความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ

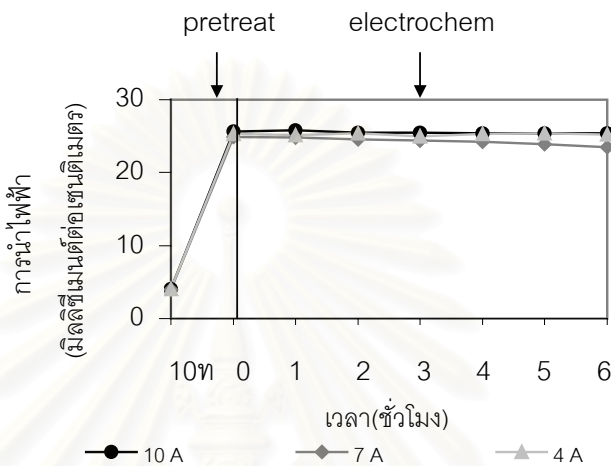
ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่าน 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
ความเป็นกรด-เบส	3.85	4 (แอมแปร์)	7 (แอมแปร์)	10 (แอมแปร์)
		3.46	3.01	2.74



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร

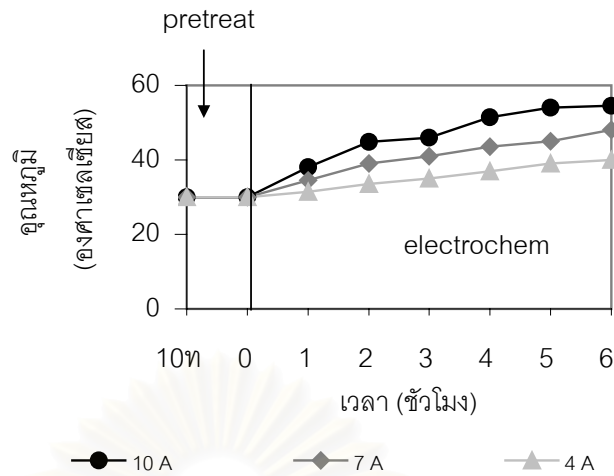
รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่า ในช่วงของกระบวนการตกตะกอน การเติมสารอะลูมิเนียมซัลเฟตและการเติมสารโซเดียมคลอไรด์ทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์นั้นสามารถแตกตัว

ให้ไอออนได้ ดังนั้นการนำไฟฟ้าจึงมากขึ้นด้วย เมื่อเข้าสู่ช่วงกระบวนการเคมีไฟฟ้าซึ่งเป็นช่วงหลังการตกตะกอน พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของทุกความเข้มข้นกระแสไฟฟ้ามักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเกิดปฏิกิริยามีทั้งการให้ไอออนและการหายไปของไอออนในระบบ สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งทางตรงและทางอ้อม



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ระดับความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่า เมื่อผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส แต่เมื่อผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้าอุณหภูมิระบบสูงขึ้นตามเวลาที่ทำการบำบัดและคงที่ในที่สุด สาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในรูปแบบต่างๆ กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานทางเคมี และบางส่วนของกระแสไฟฟ้าสูญเสียไปในรูปแบบความร้อน จากการทดลองเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ อุณหภูมิของระบบสูงที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าอื่นๆ ที่เป็นเช่นนี้เพราะปรากฏการณ์ฟิล์มที่เกิดขึ้นรอบเม็ดแกรไฟต์และการขวางกั้นของอนุภาคในน้ำเสีย ซึ่งน้ำกากส่ามีตะกอนสูงมากก่อให้เกิดการขวางกั้นปฏิกิริยาบนพื้นผิวได้ ที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์มีปริมาณอิเล็กตรอนบนผิวเม็ดอิเล็กโทรดที่สูงเมื่อการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง อิเล็กตรอนไม่สามารถถ่ายเทมาให้ไอออนหรือไอออนที่จะเข้าไปรับอิเล็กตรอนเป็นไปได้อย่าง ความร้อนสะสมจึงเกิดขึ้น นอกจากนี้ความร้อนอาจเกิดขึ้นมาจากการเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกัน



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่ความ
เข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆเมื่อให้ความเข้มข้น
โซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่า ทุกๆ ความเข้มกระแสไฟฟ้ามีผลทำให้ร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้นตามเวลาและคงที่เมื่อเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเวลาของการบำบัดผ่านไป 6 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8

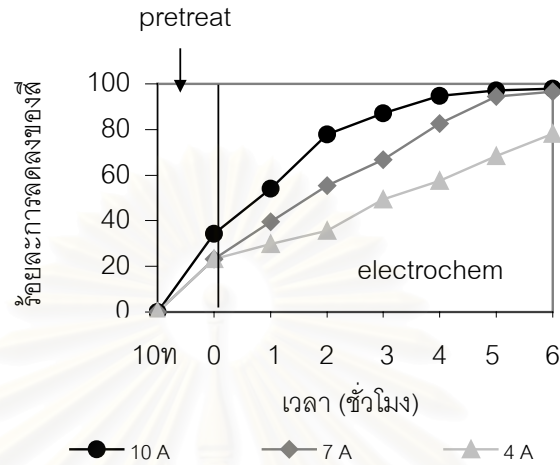
ตารางที่ 4.8 ร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่าน 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
สี	23.5	4 (แอมแปร์)	7 (แอมแปร์)	10 (แอมแปร์)
		78	96	98

จากผลการทดลอง พบว่าที่ความเข้มกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ให้การบำบัดสีสูงที่สุด กล่าวคือร้อยละ 98 สามารถอธิบายลำดับการเปลี่ยนแปลงของสี ได้โดยแยกออกเป็น 2 ช่วงดังนี้

1) ช่วงแรกเป็นการผ่านกระบวนการตกตะกอน สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 23.5 การลดลงของสีเกิดขึ้นด้วยกลไกการตกตะกอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1

2) ช่วงที่สองเป็นการผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้า ผลที่เกิดขึ้นคือ กระบวนการเคมีไฟฟ้าทำให้บำบัดสีได้ดีที่สุดถึงร้อยละ 98 กลไกการลดลงของสีสำหรับกระบวนการเคมีไฟฟ้าได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.35 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้า 4 7 10 แอมแปร์ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.35 แสดงลำดับการบำบัดสีกับเวลา ที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่า ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสี เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง เห็นได้ชัดว่าที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ให้ค่าการลดลงของสีมากที่สุด โดยให้ค่าการบำบัดสีถึงร้อยละ 98 ลักษณะของสีใกล้เคียงกับสีของน้ำ

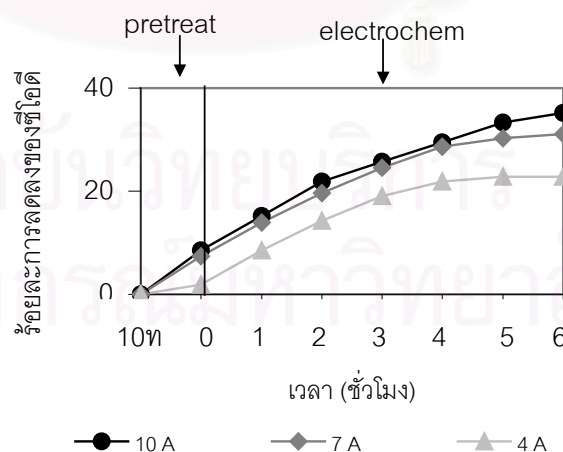
รูปที่ 4.36-4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาและบีไอดีกับเวลา ที่ระดับความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่า ทุกความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าให้ร้อยละการลดลงของซีไอดีเพิ่มขึ้นตามเวลา และร้อยละการลดลงของบีไอดีเพิ่มขึ้นตามเวลาเช่นกัน ผลการบำบัดเมื่อเวลาผ่านไปครบ 6 ชั่วโมงเป็นดังตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.9 ร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ

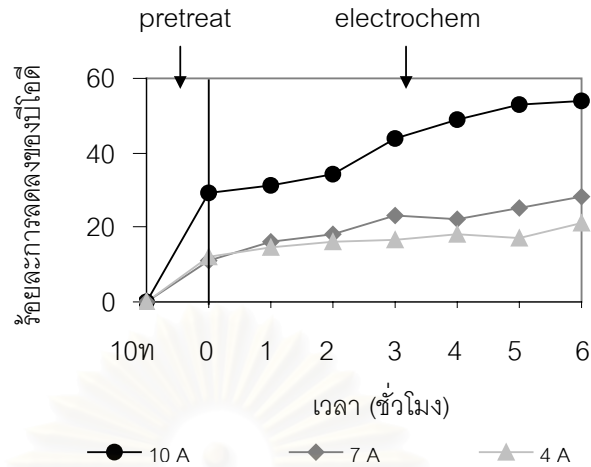
ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่าน 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
ซีไอดี		4 (แอมแปร์)	7 (แอมแปร์)	10 (แอมแปร์)
	3-13	23	31	35

ตารางที่ 4.10 ร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่าน 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
บีไอดี		4 (แอมแปร์)	7 (แอมแปร์)	10 (แอมแปร์)
	15-26	21	28	54



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร



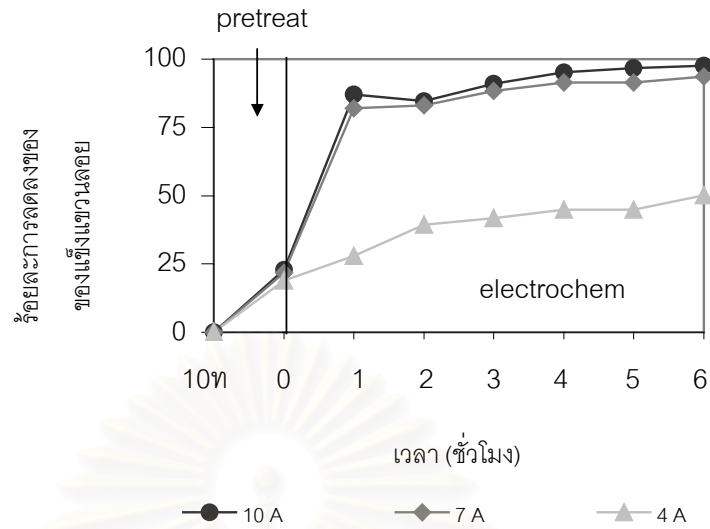
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงบีโอดีกับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร

จากการทดลอง พบว่าความเข้มกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดของซีโอดีและบีโอดีได้ดีที่สุด กล่าวคือ บำบัดได้ร้อยละ 35 และ 54 ตามลำดับ

รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่ระดับความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่าทุกความเข้มกระแสไฟฟ้ามีผลทำให้ร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นตามเวลา ผลการบำบัดเมื่อเวลาผ่านไปครบ 6 ชั่วโมงเป็นดังตารางที่ 4.11

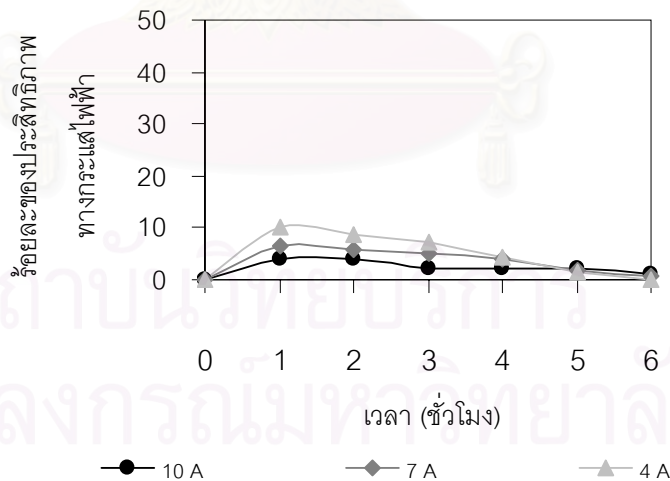
ตารางที่ 4.11 ร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่าน 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต + สารก่อการจับกลุ่ม)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
ของแข็งแขวนลอย		4 (แอมแปร์)	7 (แอมแปร์)	10 (แอมแปร์)
	21	50	94	98



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอย กับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อให้ความเข้มข้น โซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของประสิทธิภาพทางกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) กับเวลาที่ระดับความเข้มของกระแสไฟฟ้าต่างๆ โดยประสิทธิภาพทางกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.9



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของประสิทธิภาพทาง กระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มกระแสไฟฟ้าต่างๆ

$$ICE = \frac{[(COD)_t - (COD)_{t+\Delta t}]F.V}{8I\Delta t} \quad (4.9)$$

COD_t = ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลา t ชั่วโมง (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

$COD_{t+\Delta t}$ = ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลา $t+\Delta t$ ชั่วโมง (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (คูลอมบ์ต่อโมลของออกซิเจน)

V = ปริมาตรของอิเล็กโทรไลต์ (ลิตร)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

Δt = เวลาที่เปลี่ยนไป (ชั่วโมง)

พบว่าที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 4 7 และ 10 แอมแปร์ ให้อัตราของประสิทธิภาพทางกระแสไฟฟ้าเป็น 10 7 และ 4 ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ ให้อัตราของประสิทธิภาพทางกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อพิจารณาจากข้อมูลอัตราของประสิทธิภาพทางกระแสไฟฟ้าแล้ว ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ต่อไป แต่เนื่องจากการบำบัดด้วยเครื่อง 3PE นี้ให้อัตราการลดลงของซีโอดีมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการลดลงของซีโอดีตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ให้อัตราการลดลงของซีโอดี เท่ากับ 35 ส่วนอัตราการลดลงของซีโอดีเท่ากับ 98 (ดังรูปที่ 4.36) ดังนั้นวิธีการนี้จึงมีความเหมาะสมกับการบำบัดซีโอดี เลือกใช้กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ในการทดลองต่อไป

จากการศึกษาที่ผ่านมาตั้งแต่หัวข้อที่ 4.2.1-4.2.5 ได้ภาวะที่ดีที่สุด คือ

- ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต 4 กรัมต่อลิตร
- เม็ดแกรไฟต์ 500 กรัม
- รูปแบบการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE
- ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร
- ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์

แต่เมื่อพิจารณาโดยภาพรวม การลงทุนในอุตสาหกรรมต้องการลดต้นทุนในการบำบัดให้ได้มากที่สุด เนื่องจากผลการบำบัดของน้ำเสียนี้ เห็นได้ว่า การบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สาร

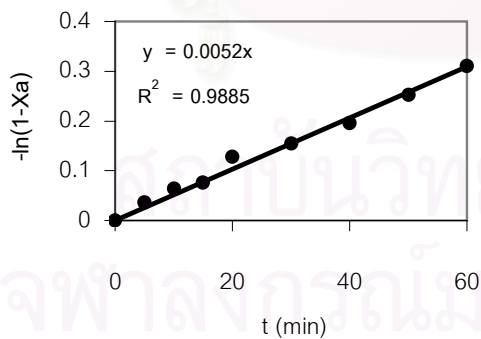
อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE และการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลการบำบัดของน้ำเสียไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาผลการบำบัดของน้ำเสียสำหรับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร พบว่าให้ผลการบำบัดของสีต่างกันไม่เกินร้อยละ 4 ที่เวลา 6 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 4.26) ดังนั้นในการทดลองระบบต่อเนื่องจึงใช้เลือกใช้ภาวะที่เหมาะสมคือ

- ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต 4 กรัมต่อลิตร
- เม็ดแกรไฟต์ 1000 กรัม
- รูปแบบการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านด้วยเครื่อง 3PE
- ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร
- ความเข้มกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์

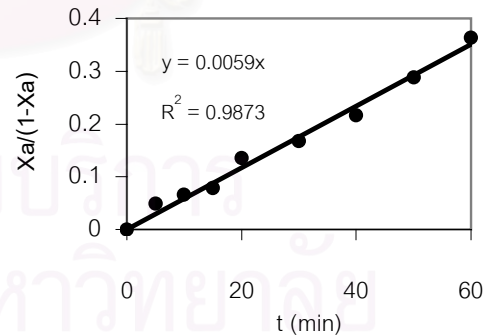
4.2.6) ศึกษาและหาสมการจลนพลศาสตร์ (Kinetics equation) (Levenspiel, 1999; ชูชาติ, 2524)

1) หาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant หรือ ค่า k)

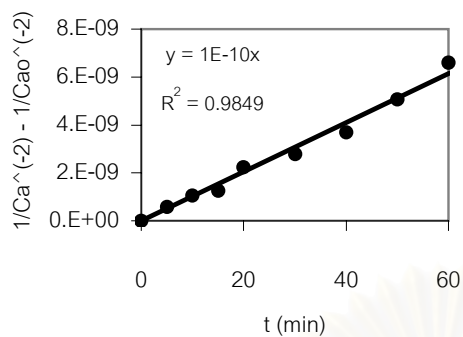
รูปที่ 4.40-4.43 แสดงปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.12



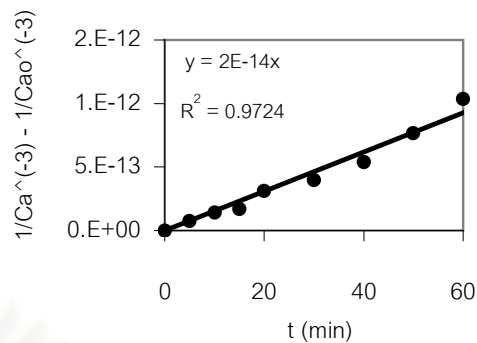
รูปที่ 4.40 ปฏิกิริยาอันดับที่ 1



รูปที่ 4.41 ปฏิกิริยาอันดับที่ 2



รูปที่ 4.42 ปฏิกริยาอันดับที่ 3



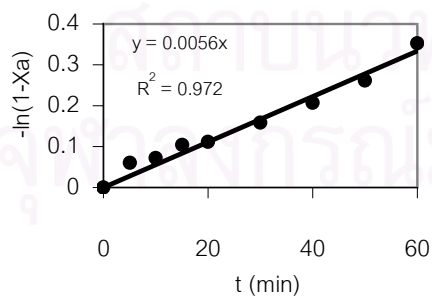
รูปที่ 4.43 ปฏิกริยาอันดับที่ 4

ตารางที่ 4.12 ค่าตัวแปรของปฏิกริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส

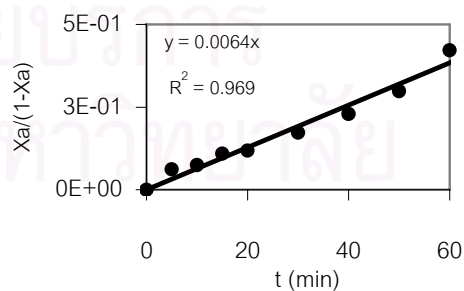
	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Equation	0.0052x	0.0059x	1E-10x	2E-14x
R ²	0.9885	0.9873	0.9849	0.9724
K	0.0052			

ผลที่ได้ พบว่า ที่อุณหภูมิ 31.5 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาเป็นอันดับที่ 1 เพราะพิจารณาจากค่า R² มีค่า 0.9885 ซึ่งมีความมากที่สุด ได้ค่า k เท่ากับ 0.0052 s⁻¹

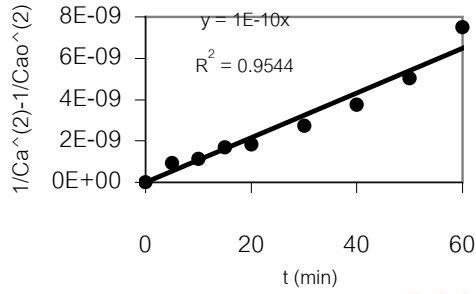
รูปที่ 4.44-4.47 แสดงปฏิกริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนของสีกับเวลาที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.13



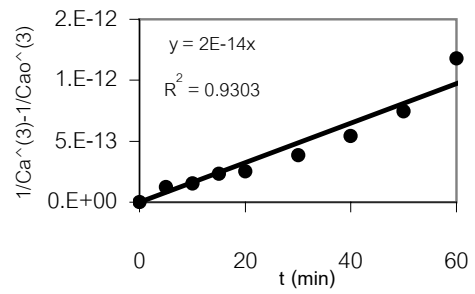
รูปที่ 4.44 ปฏิกริยาอันดับที่ 1



รูปที่ 4.45 ปฏิกริยาอันดับที่ 2



รูปที่ 4.46 ปฏิกริยาอันดับที่ 3



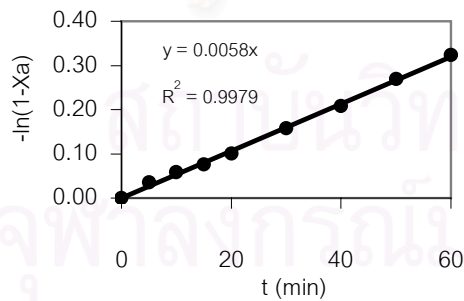
รูปที่ 4.47 ปฏิกริยาอันดับที่ 4

ตารางที่ 4.13 ค่าตัวแปรของปฏิกริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

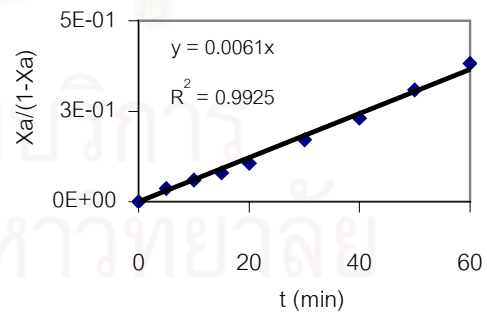
	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Equation	0.0056x	0.0064x	1E-10x	2E-14x
R ²	0.9720	0.9690	0.9544	0.9303
K	0.0056			

ผลที่ได้ พบว่า ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาเป็นอันดับที่ 1 เพราะพิจารณาจากค่า R² มีค่า 0.9720 ซึ่งมีค่ามากที่สุด ได้ค่า k เท่ากับ 0.0056 s⁻¹

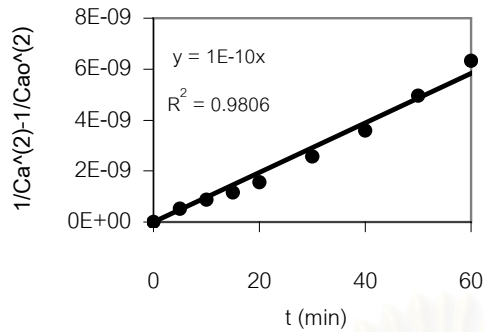
รูปที่ 4.48-4.51 แสดงปฏิกริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนของสีกับเวลาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.14



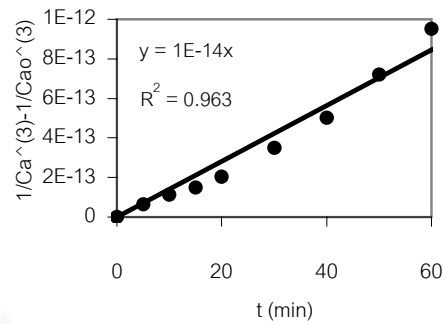
รูปที่ 4.48 ปฏิกริยาอันดับที่ 1



รูปที่ 4.49 ปฏิกริยาอันดับที่ 2



รูปที่ 4.50 ปฏิกิริยาอันดับที่ 3



รูปที่ 4.51 ปฏิกิริยาอันดับที่ 4

ตารางที่ 4.14 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Equation	0.0058x	0.0061x	1E-10x	1E-14x
R ²	0.9979	0.9925	0.9806	0.9630
K	0.0058			

ผลที่ได้ พบว่า ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเป็นอันดับที่ 1 เพราะพิจารณาจากค่า R² มีค่า 0.9979 ซึ่งมีค่ามากที่สุด ได้ค่า k เท่ากับ 0.0058 s⁻¹

2) หาค่าความถี่หรือปัจจัยพรีเอ็กโปเนนเชียล (Frequency or pre-exponential factor ; K₀) กับพลังงานกระตุ้น (Activation energy ; E_a)

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ

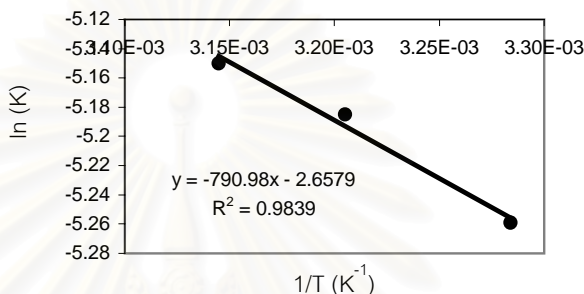
T (°C)	T (K)	$\frac{1}{T}$ (K ⁻¹)	K (S ⁻¹)	ln(K)
31.5	305	0.00328	0.0052	-5.2591
39	312	0.00321	0.0056	-5.1850
45	318	0.00314	0.0058	-5.1499

จากกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius' law)

$$k = k_o e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (4.10)$$

$$\ln k = \frac{-E_a}{RT} + \ln(k_o) \quad (4.11)$$

รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกกาลิทึมฐานยี่ของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\ln k$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$)



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างล็อกกาลิทึมฐานยี่ของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\ln k$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$)

ผลการทดลองนี้ เห็นได้ว่า กราฟตัดแกน x จะได้ค่า $\ln (K_o)$ มีค่า -2.6579 ดังนั้นจะได้ค่า K_o เท่ากับ 0.0701 S^{-1} ส่วนความชันของกราฟ จะได้ค่า $-E_a/R$ เท่ากับ -790.98 ฉะนั้น E_a เท่ากับ 6576.21 จูลต่อโมล หรือประมาณ 6.576 กิโลจูลต่อโมล

สมการจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของสี่ คือ

$$-r = kC \quad (4.12)$$

$$-r = k_o e^{\frac{-E_a}{RT}} (C) \quad (4.13)$$

$$-r = 0.07e^{\frac{-790.98}{T}} (C) \quad (4.14)$$

4.3) ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

4.3.1) ศึกษาอัตราการไหลที่ดีที่สุดและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่

ก1) อัตราการไหล

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาอัตราการไหลที่ดีที่สุด โดยนำภาวะของการทำงานในระบบกะมาประยุกต์ใช้กับระบบต่อเนื่อง ซึ่งการทดลองในระบบกะที่ผ่านมามีปริมาตรทั้งหมดที่ใช้ในการบำบัด 8 ลิตร เวลาของการบำบัดที่ดีที่สุด 6 ชั่วโมง จากการคำนวณดังสมการที่ 4.14 ทำให้ได้อัตราการไหลที่ควรเลือกใช้ คือ 8/6 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 1.33 ลิตรต่อชั่วโมง

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.15)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล มีหน่วยเป็นลิตรต่อชั่วโมง

V = ปริมาตรทั้งหมดในเครื่อง 3PE มีหน่วยเป็นลิตร

t = เวลาการบำบัดที่ดีที่สุด มีหน่วยเป็นชั่วโมง

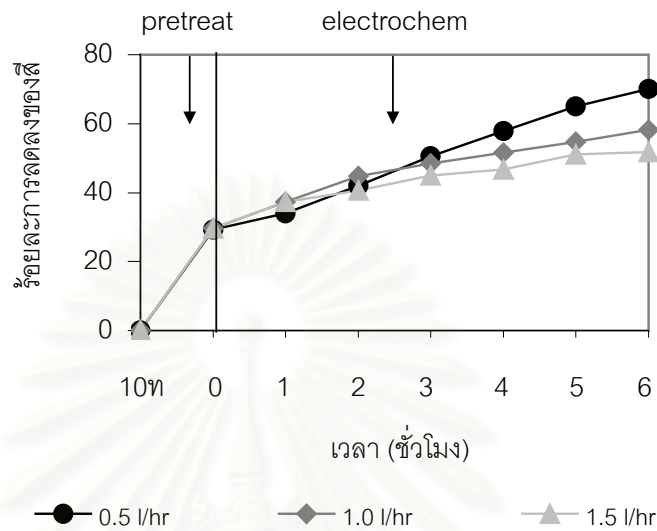
รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ โดยร้อยละการลดลงของสีแปรผกผันกับอัตราการไหล กล่าวคือ ร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง ซึ่งผลการบำบัดสีเมื่อสิ้นชั่วโมงที่ 6 เป็นดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
สี	30	0.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.0 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)
		70	58	52

ผลที่ได้รับอธิบายได้ว่าที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถบำบัดสีได้สูงสุดร้อยละ 70 ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่ออัตราการไหลต่ำน้ำกากส่าใช้เวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นาน (Resident time) ในทำนองเดียวกัน น้ำกากส่ามีเวลาสัมผัสกับเม็ดขี้ไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน (Contact time) ฉะนั้นโอกาสที่สารอินทรีย์จะเกิดปฏิกิริยาข่มเป็นไปได้ดี สีของน้ำกากส่าจึงลดลงมาก ซึ่งกลไกของกระบวนการตกตะกอนและเคมีไฟฟ้าได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1-4.2.2 นอกจากนี้ พบว่าที่

อัตราการไหลต่ำจะทำให้การบำบัดสีเข้าสู่ภาวะสมดุลช้ากว่าที่อัตราการไหลสูง (ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.54)



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 4.54 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 1.0 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง

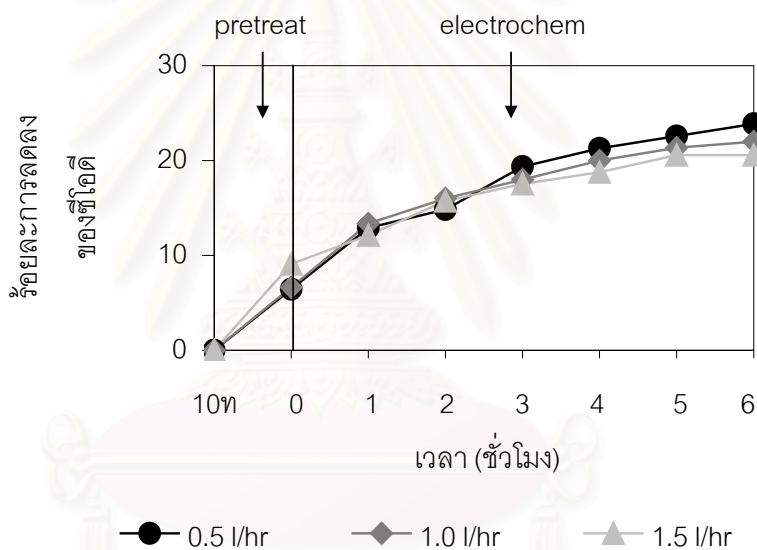
รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ โดยร้อยละการลดลงของซีไอดีเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง ซึ่งผลการบำบัดซีไอดีเมื่อสิ้นชั่วโมงที่ 6 เป็นดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ร้อยละการลดลงของซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
ซีโอดี	5-8	0.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.0 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)
		24	22	21

จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการไหลต่ำให้ร้อยละการลดลงของซีโอดีสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการบำบัด กล่าวคือ ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ร้อยละการลดลงของซีโอดีสูงสุด

24



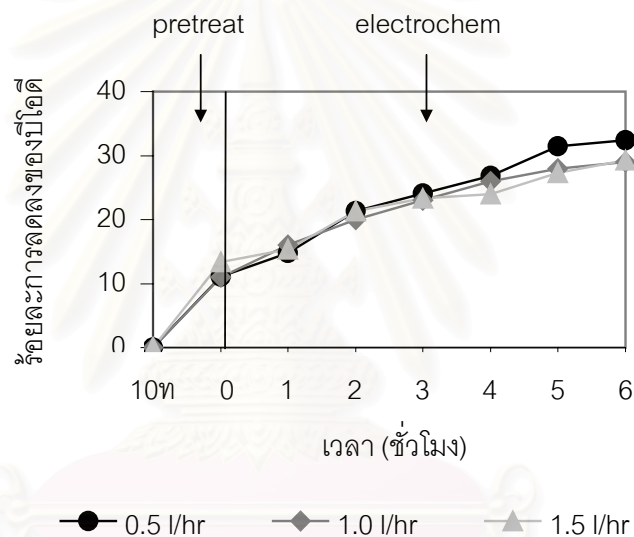
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ โดยร้อยละการลดลงของซีโอดีเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง ซึ่งผลการบำบัดซีโอดีเมื่อสิ้นชั่วโมงที่ 6 เป็นดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
บีโอดี	5-8	0.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.0 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)
		32	29	29

ผลที่ได้ พบว่า อัตราการไหลต่ำให้ร้อยละการลดลงของบีโอดีสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการบำบัด กล่าวคือ ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้อัตราการลดลงของบีโอดีมีค่าสูงสุด 32



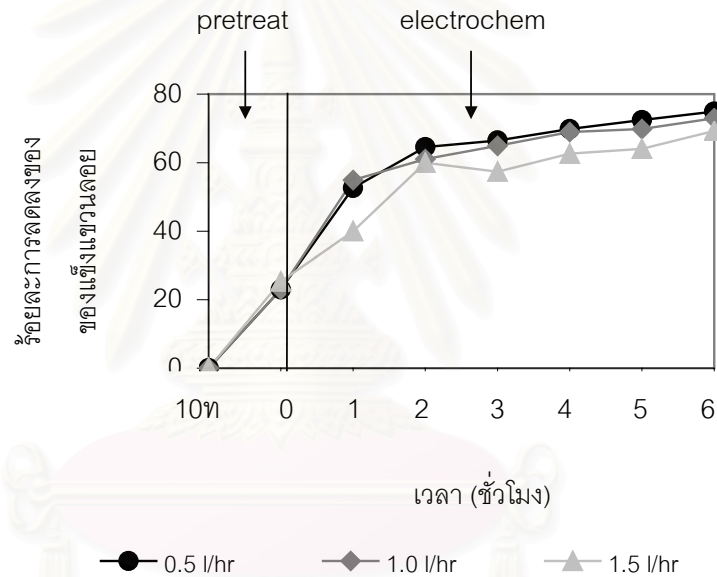
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ โดยร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลงเช่นเดียวกับในกรณีของซีซีโอดี และบีโอดี ซึ่งผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยเมื่อสิ้นชั่วโมงที่ 6 เป็นดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

ตัวแปร	การบำบัดด้วยการตกตะกอนก่อนผ่านเครื่อง 3PE (อะลูมิเนียมซัลเฟต)			
	กระบวนการตกตะกอน	กระบวนการตกตะกอน + กระบวนการเคมีไฟฟ้า		
ของแข็งแขวนลอย	24	0.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.0 (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.5 (ลิตรต่อชั่วโมง)
		75	73	69

ผลที่ได้ พบว่า อัตราการไหลต่ำให้ร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการบำบัด ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยสูงสุดคือ 75

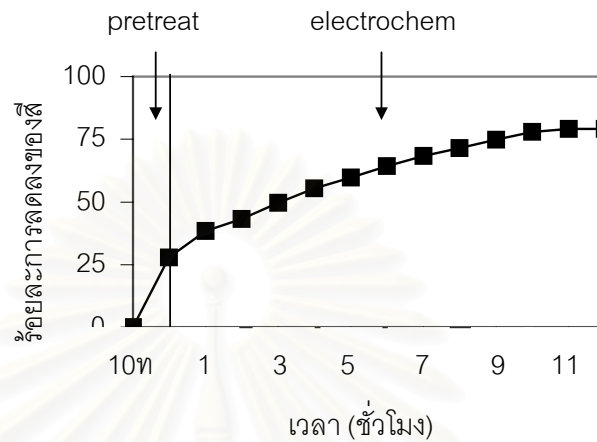


รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

ข1) เวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่

หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาโดยขยายเพิ่มเติมจากหัวข้อ ก1 เพื่อศึกษาหาเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ของระบบต่อเนือง ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง และเวลาการทดลองทั้งหมด 12 ชั่วโมง

รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้นตามเวลาและเข้าสู่ภาวะคงที่ในที่สุด (ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.59)



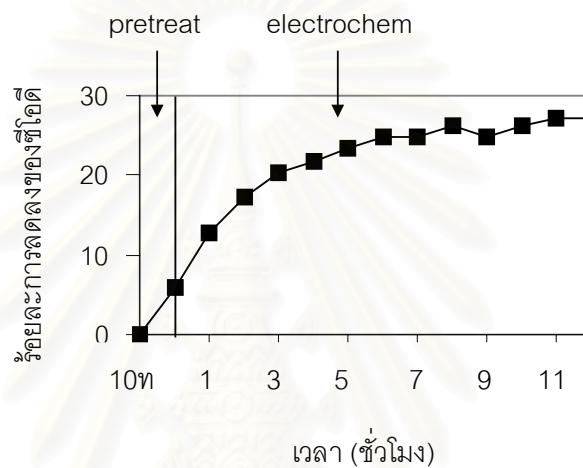
รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.59 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงร้อยละการลดลงของสีสูงมากในช่วงแรกและลดลงในเวลาต่อมา จนกระทั่งเข้าสู่ชั่วโมงที่ 9-10 อัตราการเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 2 เมื่อเวลามาถึงชั่วโมงที่ 11-12 การเปลี่ยนแปลงของสีไม่มีความเปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ผลการบำบัดสีร้อยละ 79 ณ ชั่วโมงที่ 11 เป็นเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่หรือภาวะสมดุลของการเกิดปฏิกิริยา

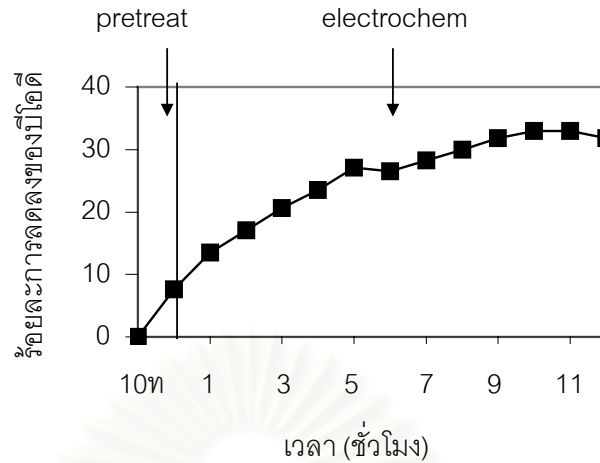
รูปที่ 4.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยร้อยละการลดลงของซีไอดีเพิ่มขึ้นตามเวลาและเข้าสู่ภาวะคงที่ในที่สุด



รูปที่ 4.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของซีไอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงร้อยละการลดลงของซีไอดีสูงมากในช่วงแรกและลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไปจนกระทั่งเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6 เป็นต้นมา ความแตกต่างของซีไอดีไม่เกินร้อยละ 1-2 เมื่อเวลามาถึงชั่วโมงที่ 11-12 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการลดลงของซีไอดีไม่มีความแตกต่างเลย โดยมีค่าร้อยละ 27 โดยประมาณ ณ ชั่วโมงที่ 11 นี้เป็นเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่หรือภาวะสมดุลของการเกิดปฏิกิริยา

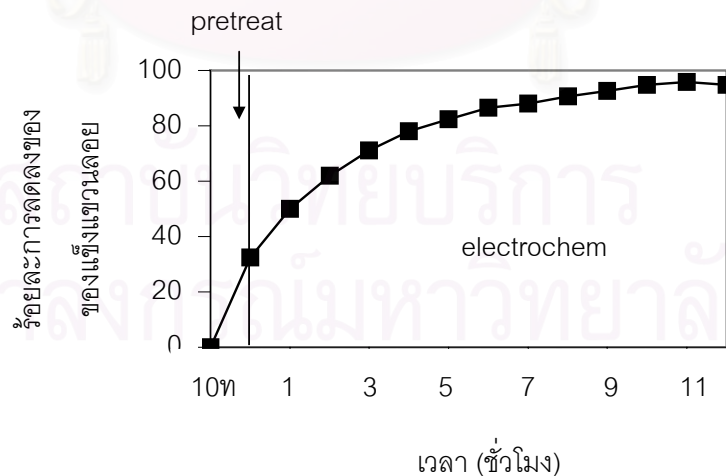
รูปที่ 4.61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของบีไอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าร้อยละการลดลงของบีไอดีเพิ่มขึ้นตามเวลาและเข้าสู่ภาวะคงที่ในที่สุด



รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ร้อยละการลดลงของบีโอดี
กับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างร้อยละการลดลงของบีโอดีสูงมากในช่วงแรกและลดลงในเวลาต่อมา เมื่อเวลามาถึงชั่วโมงที่ 9-12 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการลดลงของบีโอดีมีค่าในช่วง 32-33 โดยมีความแตกต่างน้อยมากไม่เกินร้อยละ 1 ณ ชั่วโมงที่ 11 นี้จัดเป็นเวลาเข้าสู่ภาวะคงที่หรือภาวะสมดุลของการเกิดปฏิกิริยา

รูปที่ 4.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นตามเวลาและเข้าสู่ภาวะคงที่ในที่สุด



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยสูงมากในช่วงแรกและลดลงในช่วงเวลาต่อมา เมื่อเวลาดำเนินมาถึงชั่วโมงที่ 10-12 ค่าร้อยละการลดลงของแข็งแขวนลอยมีความแตกต่างกันน้อยมากไม่เกินร้อยละ 1 โดยมีค่าประมาณ 95-96 ณ ชั่วโมงที่ 11 นี้จัดเป็นเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่หรือภาวะสมดุลของการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.20 แสดงร้อยละการลดลงของคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยทำการหาค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของทั้งน้ำกากส่าที่อัตราเจือจาง 10 เท่าเริ่มต้น น้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการตกตะกอน และน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนก่อนเข้าสู่กระบวนการเคมีไฟฟ้า ตามลำดับ ณ เวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลในนี้เลือกชั่วโมงที่ 12 มาทำการวิเคราะห์ พบว่าผลการบำบัดน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนและน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้า ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุล 12 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 11 และ 17 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 ร้อยละการลดลงของคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดกับเวลาที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขวดที่	คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการลดลงของคาร์บอน อินทรีย์ทั้งหมด
10ท	4465	0
0	3966	11
12	3737	17

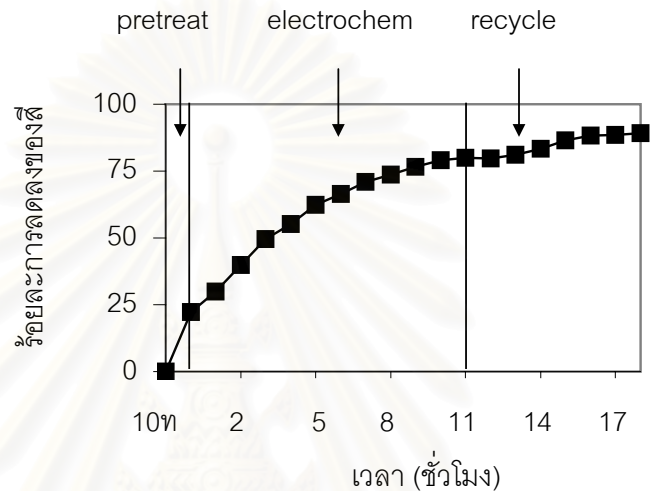
ในส่วนของการศึกษาอัตราการไหลที่ดีที่สุดและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ จึงสรุปได้ว่า อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง และเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ 11 ชั่วโมง เป็นภาวะที่ดีที่สุดและมีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาในลำดับต่อไป ด้วยการศึกษาที่อัตราการไหลต่ำน้ำกากส่ามีเวลาสัมผัสกับเม็ดแกรไฟต์มากขึ้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่ามีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาย่อมมีมากขึ้นเช่นกัน และในด้านการลงทุนการใช้เวลามากการลงทุนย่อมมาก ที่ชั่วโมงที่ 11-12 สำหรับการบำบัดสี ซีไอดี บีไอดี ของแข็งแขวนลอยไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ชั่วโมงที่ 11 จึงถูกนำมาใช้เป็นเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุลของปฏิกิริยา ทั้งหมดนี้ได้นำมาศึกษาต่อในระบบต่อเนื่องแบบย้อนกลับต่อไป

4.3.2) ศึกษาอัตราการป้อนย้อนกลับและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่

หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาโดยขยายเพิ่มเติมจากหัวข้อ ข1 เพื่อศึกษาผลของอัตราการป้อนย้อนกลับและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ของระบบแบบต่อเนื่อง โดยนำอัตราการไหลของน้ำกากส่าที่ดี

ที่สุดคือ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งทำการทดลองนานถึง 11 ชั่วโมงก่อนที่จะเริ่มต้นกระบวนการป้อนย้อนกลับ

รูปที่ 4.63 แสดงความสัมพันธ์หรืออัตราการลดลงของสีกับเวลา สำหรับอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยอัตราการลดลงของสีเพิ่มขึ้นตามเวลาและคงตัวในที่สุด หลังจากนั้นเมื่อระบบถูกรบกวนด้วยการไหลป้อนกลับ ระบบจะปรับตัวให้เข้าสู่ภาวะคงตัวอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีอัตราการป้อนย้อนกลับร้อยละ 90 และอัตราการไหลเข้ากับออกร้อยละ 10

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 11 อัตราการลดลงของสีเป็น 80 เพราะเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยา จุดนี้ถือว่าเป็นภาวะคงที่ซึ่งถ้าทำการบำบัดต่อไปอัตราการลดลงของสีจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก จึงเริ่มกระบวนการป้อนย้อนกลับโดยให้อัตราการป้อนย้อนกลับเป็น 0.45 ลิตรต่อชั่วโมง (หรือคิดเป็นร้อยละ 90 ของอัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง) ส่วนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเข้าถึงผสมน้ำกากส่าเป็น 0.05 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลออกของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็น 0.05 ลิตรต่อชั่วโมงเท่ากัน (หรือคิดเป็นร้อยละ 10 ของอัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง) สาเหตุที่เลือกอัตราการป้อนย้อนกลับเป็นร้อยละ 90 ของอัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง เพราะต้องการให้น้ำหลังการบำบัดมาผสมกับน้ำกากส่าที่ไม่ผ่านการเจือจางมากที่สุด เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายของน้ำประปา ซึ่งจากการทดลองจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงที่นั้น ทำให้ประหยัดน้ำที่ใช้ในการผสมได้กว่า 4 ลิตร ประกอบกับเหตุผลของความสามารถของปั๊ม (Peristaltic pump) และขนาดสายยางที่ใช้มีอัตราการไหลออกต่ำสุดที่สามารถทำได้อยู่ที่ 0.05 ลิตรต่อชั่วโมง

(Minimum flow rate) ผลจากไหลย้อนกลับอธิบายได้ว่า ช่วงเวลาที่ไหลย้อนกลับ 1 ชั่วโมงแรก (หรือชั่วโมงที่ 12) พบว่าร้อยละการลดลงของสีเป็น 80 ซึ่งมีความแตกต่างจากชั่วโมงที่ 11 น้อยมากโดยมีความแตกต่างร้อยละ 1 โดยประมาณ การที่ร้อยละการลดลงของสียังคงที่อยู่เนื่องมาจากน้ำใหม่ยังไม่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ณ จุดนี้ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการรบกวนระบบอันจะนำไปสู่ภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) อีกครั้งหนึ่ง เมื่อระบบเริ่มดำเนินมาถึงช่วงเวลาไหลย้อนกลับชั่วโมงที่ 2-4 (หรือชั่วโมงที่ 13-15) ระบบเกิดการปรับตัวเพื่อเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ขณะที่ช่วงเวลาไหลย้อนกลับดำเนินมาถึงชั่วโมงที่ 5 เป็นต้นไป (หรือชั่วโมงที่ 16 เป็นต้นไป) จะได้ว่า ร้อยละการลดลงของสีอยู่ที่ 88-89 ซึ่งเข้าสู่ภาวะคงที่อีกครั้งหนึ่ง เพราะฉะนั้นอาจอนุมานได้ว่า ชั่วโมงที่ 5 (หรือชั่วโมงที่ 16 ของการทำงาน) จัดเป็นเวลาของการเข้าสู่ภาวะคงที่ครั้งแรก ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการป้อนย้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 4.64



รูปที่ 4.64 แสดงลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาที่อัตราการไหลผ่าน

เครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีอัตราการ

ป้อนย้อนกลับร้อยละ 90 และอัตราการไหลเข้ากับออกร้อยละ 10

4.4) ต้นทุนการบำบัด

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

4.4.1 ระบบกะ เมื่อพิจารณาจากการคำนวณในภาคผนวก ง ที่ ง.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปทรงแบบพัลส์สำหรับระบบกะ พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอย ได้ร้อยละ 98 35 54 และ 98 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการบำบัด 319.73 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 8.64 เหรียญต่อลูกบาศก์เมตร จะเห็นได้ว่าระบบกะมีต้นทุนที่สูง โดยค่าใช้จ่ายหลักมาจากค่าไฟฟ้าและค่าสารเคมีในการดำเนินงาน อย่างไรก็ตาม ระบบกะเป็นระบบที่ไม่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม

4.4.2 ระบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาจากการคำนวณในภาคผนวก ง ที่ ง.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปทรงแบบพัลส์สำหรับระบบต่อเนื่อง พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอย ได้ร้อยละ 79 27 32 และ 96 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการบำบัด 226.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 6.11 เหรียญต่อลูกบาศก์เมตร จะเห็นได้ว่า ค่าใช้จ่ายในระบบกะสูงกว่าในระบบต่อเนื่องที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเหตุผลของการเติมสารเคมี โดยระบบกะใช้โซเดียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร (170 บาท) ส่วนระบบต่อเนื่องใช้โซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร (95 บาท) อย่างไรก็ตามเมื่อมีกระบวนการป้อนย้อนกลับร่วมด้วยจะทำให้ต้นทุนต่ำกว่า 226.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือต่ำกว่า 6.11 เหรียญต่อลูกบาศก์เมตร

หมายเหตุ การบำบัดด้วยเครื่อง 3PE เป็นวิธีที่สามารถใช้ในการบำบัดสีได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานเนื่องจากน้ำเสียมีความสกปรกสูงมาก (ดังตารางที่ 4.1)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสุราด้วยการอาศัยทฤษฎีพื้นฐานเคมีไฟฟ้า ฟลูอิดิไดเซชัน และการตกตะกอนด้วยสารช่วยตกตะกอนมาใช้ โดยผ่านทางเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุน แบบพัลส์ร่วมกับการตกตะกอน ทำให้สามารถบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ จากการทดลอง สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ตอน

ตอนที่ 1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำกากส่า

- 1.1) การวิเคราะห์หาค่าสมบัติทางน้ำของน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ พบว่าค่าวิเคราะห์ทั้งหมดไม่ผ่านเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำทิ้งของอุตสาหกรรม
- 1.2) ทำการหาค่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงในน้ำกากส่าโดยใช้เครื่อง UV Spectrophotometer ได้ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) 456 นาโนเมตร
- 1.3) ศึกษาและเปรียบเทียบการเกิดออกซิเดชันของน้ำกากส่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ ในเครื่องโพเทนทิโอสแตต (Potentiostat/Galvanostat) สรุปได้ว่า น้ำกากส่าสามารถเกิดการออกซิเดชันได้ดีที่ภาวะความเป็นกรด แต่เนื่องจากการลงทุนที่สูงสำหรับการใช้กรดในการปรับค่าความเป็นกรด-เบส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่ทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสเลย ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำกากส่าอยู่ที่ 4.77 โดยประมาณ

ตอนที่ 2 ระบบปฏิบัติการแบบกะ

- 2.1) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารตกตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่งความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมคือ 4 กรัมต่อลิตร ให้อัตราการลดลงของสี ซีไอดี และของแข็งแขวนลอย 63.1 10.1 และ 39 ตามลำดับ
- 2.2) ศึกษาและเปรียบเทียบชนิดของเม็ดขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ พบว่าเม็ดแกรไฟต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเม็ดไทเทเนียม และด้วยการที่เม็ดแกรไฟต์มีต้นทุนถูกกว่าเม็ดไทเทเนียมจึงเป็นเหตุผลในการนำเม็ดแกรไฟต์มาใช้ โดยผลที่ได้รับของเม็ดแกรไฟต์และไทเทเนียมสามารถบำบัดสี ซีไอดี บีไอดีและของแข็งแขวนลอยได้ดังนี้

เม็ดแกรไฟต์ สามารถบำบัดสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยบำบัดได้ร้อยละ 27 17 23 และ 90 ตามลำดับ

เม็ดไทเทเนียม สามารถบำบัดสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยบำบัดได้ร้อยละ 17 10 15 และ 84 ตามลำดับ

- 2.3) ศึกษารูปแบบการทำงานร่วมกันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์และการตกตะกอน พบว่าการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อนการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE ให้ผลการบำบัดที่ดีที่สุด แต่ผลการทดลองที่ได้ไม่แตกต่างจากการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตก่อนผ่านเครื่อง 3PE ซึ่งผลการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อนการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE สามารถบำบัดสี ซีไอดี บีไอดีและของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 75 25 22 และ 80 ตามลำดับ
- 2.4) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อนการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อการบำบัดสีและสารอินทรีย์ไม่มากนัก ภาวะที่ดีที่สุดคือ 10 กรัมต่อลิตร ให้ร้อยละการลดลงของสี ซีไอดี บีไอดีและของแข็งแขวนลอย 97 31 28 และ 94 ตามลำดับ
- 2.5) ศึกษาผลกระทบของความเข้มกระแสไฟฟ้าในการบำบัดด้วยการตกตะกอนที่ใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับสารก่อนการจับกลุ่มก่อนผ่านเครื่อง 3PE พบว่าความเข้มกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการบำบัดสีและสารอินทรีย์มาก ค่าที่ได้จากการศึกษาคือความเข้มกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ให้ร้อยละการลดลงของสี ซีไอดี บีไอดีและของแข็งแขวนลอย 98 35 54 และ 98 ตามลำดับ
- 2.6) ศึกษาและหาสมการจลนพลศาสตร์ (Kinetic equation) ของสี ซึ่งเป็นสมการอันดับที่ 1

$$-r = 0.07e^{\frac{-790.98}{T}} (C)$$

ตอนที่ 3 ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง

- 3.1) ศึกษาอัตราการไหลที่ดีที่สุดและเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ พบว่าอัตราการไหลที่ดีที่สุดต่อการบำบัดคือ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ค่าร้อยละการลดลงของสี ซีไอดี บีไอดีและของแข็งแขวนลอย 70 24 32 และ 75 ตามลำดับ และเมื่อหาเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่สำหรับอัตรา

การไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ได้เวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่คือ 11 ชั่วโมง ให้อัตราการลดลงของสี ซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอย 79 27 32 และ 96 ตามลำดับ

- 3.2) ศึกษาผลกระทบจากอัตราการป้อนย้อนกลับ (Recycle flow rate) และเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่ พบว่าอัตราการป้อนย้อนกลับเป็น 0.45 ลิตรต่อชั่วโมง (หรือคิดเป็นร้อยละ 90 ของอัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง) ส่วนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเข้าถังผสมน้ำกากส่าเป็น 0.05 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลออกของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็น 0.05 ลิตรต่อชั่วโมง เท่ากัน (หรือคิดเป็นร้อยละ 10 ของอัตราการไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง) สามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลที่ดีที่สุดต่อการบำบัดคือ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง และเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงที่คือ 11 ชั่วโมง เมื่อเริ่มกระบวนการป้อนย้อนกลับระบบได้ปรับตัวเข้าสู่ภาวะคงที่โดยใช้ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ให้ค่าการบำบัดสีร้อยละ 89

ข้อเสนอแนะ

- ในการศึกษาระบบกะ แม้ว่าจะได้ภาวะที่ดีที่สุดก็ตาม แต่ในการทำงานจริงภาวะต่างๆ ย่อมมีปัจจัยอื่นอีกมาก จำเป็นต้องปรับให้เหมาะสมกับสภาพการลงทุนด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรรณิการ์ สิริสิงห. เคมีของน้ำ: น้ำใสโคโรกและการวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏจันทรเกษม พิมพ์ครั้งที่ 3, 2544.
- กัณฑมาศ สุทธิเรืองวงศ์. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2539.
- กิตติ ไสภณภักดี. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุราโดยขบวนการอาร์บิซีที่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์, 2539.
- เกรียงไกร เสนจันทร์ศิไชย, พรเลิศ ปิยะอารีธรรม. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรากับเครื่องปฏิกรณ์แบบพัลส์ที่ขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนและน้ำซึมผ่านได้. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์บริษัทแปลน กราฟิค จำกัด, 2545.
- ชูชาติ ธรรมเจริญ. อุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์เคมี. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2525.
- เพชรพร เชาวกิจเจริญ. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2538.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มาลี วิชาจารย์. การใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าโรงงานสุราในการผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2531.
- มันลิน ตันฑุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพมหานคร : บริษัทแซน.อี 68 แลป, 2543.

วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3, 2539.

ตั้งกรม คงเจาะ. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน.ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

อานนท์ ดุษฎีพรหม. การขจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำกากส่าโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนและแบบเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2538.

ภาษาอังกฤษ

Ahn D.H., Chung Y.C., Yoo Y.J., Pak D.W. and Chang W.S., Improved treatment of tannery wastewater using Zoogloea ramigera and its extracellular polymer in an activated sludge process. Biotechnology Letters 18, 8, p.917-922, 1996.

Aoshima, I., Tozowa, Y., Ohmomo, S., and Ueda, K., Production of Decolorization Activity for Molasses Pigment by Coriolus versicolor Ps4a. Agric. Biol. Chem., vol. 49(7), p.2041-2045, 1985

Bard, A.J. and Faulkner, L.R., Electrochemical Methods: Fundamental and Application 2nd edition (n.p.) : John Wiley & Sons, 2001.

Chen, G., Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology, 38, p.11-44., 2004.

Dabias, B., Coagulation and Flocculation : Theory and applications. Surfactant science series, 47,p.656-658,1993

Everett, D.H. Basic principles of colloid science. Department of physical chemistry university of Bristol, p.16-25, 1988.

Hunsom, M., Vergnes, H., Duverneuil, P., Pruksathorn, K. and Damronglerd, S. Recovering of Copper from Synthetic Solution in 3PE Reactor ScienceAsia 28 , p.153-159, 2002.

- Kato, H., and Hayase, F. An approach to estimate the chemical structure of melanoidins International Congress Series, 1245, 3 – 7, 2002.
- Kato, H., and Tsuchida, H., Estimation of Melanoidin structure by pyrolysis and oxidation. Prog.Fd. Nutr. Sci., p.147-156, 1981.
- Levenspiel, O., Chemical reaction engineering. 3rd edition : John Wiley & Sons, p.13-47, 1999
- Malik, P.K. and Sanyal, S.K. Kinetics of Decolourisation of Azo Dyes in Wastewater by UV/H₂O₂ Process. Separation and Purification Technology 36, p.167-175, 2004.
- Manisankar, P., Rani, C. and Viswanathan, S. Effect of Halides in the Electrochemical Treatment of Distillery Effluent. Chemosphere 57, p.961-966, 2004.
- Migo, V.P., Del Rosario, E.J. and Matsumura, M. Flocculation of Melanoidins Induced by Inorganic Ions. Journal of Fermentation and Bioengineering, Vol. 83, No. 3, p.287-291, 1997.
- Migo, V.P., Matsumura, M., Del Rosario, E.J. and Kataoka, H. "Decolorization of molasses wastewater using an inorganic Flocculant", Fermentation and Bioengineering, 1993, 75, p. 438-442
- Myers, D., Surfaces, interfaces and colloids : principles and applications. 2nd edition : John Wiley & Sons, p.214-230, 1999
- Ohmomo, S., Yhikawa, H., Yoshikawa, H., Nozaki, K., Nakajima, T., and Nakamura, I., Continuous of Decolorization of Molasses Waste water Using Immobilized Lactobacillus hilgardii Cell. Agric. Biol. Chem., vol. 52(10), p.2437-2441, 1988.
- Ohmomo, S., Daengsubha, W., Yoshikawa, H., Yui, M., Nozaki, K., Nakajima, T., and Nakamura, I., Screening of Anaerobic Bacteria with the ability of Decolorize Molasses Melanoidin. Agric. Biol. Chem., vol. 52(10), p.2429-2435, 1988.
- Ohmomo, S., Kamimura, I., Siriauntapiboon, S., Aoshima, I., and Attasampunna, P., Adsorption of Melanoidin to the Mycelia of Aspergillus oryzae Y-2-34. Agric. Biol. Chem., vol. 52(2), p.381-386, 1988.

- Ohmomo, S., Kaneko, Y., Siriauntapiboon, S., Somchai, P., Attasampunna, P., and Nakamura, I., Decolorization of Molasses Waste water by a Thermophilic strain, *Aspergillus fumigatus* G-2-6 Agric. Biol. Chem., vol. 51(12), p.3339-3346, 1987.
- Ohmomo, S., Aoshima, I., Sakurada, N., and Ueda, K., Purification and Some Properties of Melanoidin Decolorizing Enzyme, p. 3-4, from Mycelia of *Coriolus versicolor* Ps4a Agric. Biol. Chem., vol. 49(7), p.2047-2053, 1985
- Ohmomo, S., Itoh, N., Watanabe, Y., Tozowa, N., and Ueda, K., Continuous Decolorization of Molasses Waste Water with Mycelia of *Coriolus versicolor* Ps4a Agric. Biol. Chem., vol. 49(9), p.2551-2555, 1985
- Roquero, P., Ghanem-Lakhal, A., Cognet, P., Lacoste, G., Berlan, J., Fabre, L.P. and Duverneuil, P. A New Reactor For Industrial Organic Electrosynthesis. Chemical Engineering Science, Vol. 51, No.10, 1996
- Sagwansupyakorn, C., Damronglerd, S. and Punnapayak, H. Decolorization of Pulp Mill Wastewater by Cell Immobilization of *Phanerochaete Chrysosporium* in two Fluidized Bed Bioreactors Connecting in Series Thesis of Chulalongkorn University, Chemical Technology, 2001.
- Siriauntapiboon, S., Somchai, P., Ohmomo, S., and Atthasampunna., P., Screening of Filamentous Fungi Having the ability to Decolorize Molasses Pigment. Agric. Biol. Chem., vol. 52(2), p.387-392, 1988.
- Siriauntapiboon, S., Somchai, P., Sihanonth, P., Atthasampunna., P., Ohmomo, S., Microbial Decolorization of molasses Waste water by Mycelia *Sterillia* D 90. Agric. Biol. Chem., vol. 52(2), p.393-398, 1988.
- Song, Z., Williams, C.J., and Edyvean, R.G.J., Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. Desalination, 164, 3, p.249-259, 2004.
- Song, Z., Williams, C.J., and Edyvean, R.G.J., Sedimentation of tannery wastewater. Water Research, 34, 7, p.2171-2176, 2000.
- Vlyssides, A.G., Israilides, C.J., Loizidou, M., Karvouni, G. and Mourafeti, V. Electrochemical treatment of vinasse from beet molasses. Water Science and Technology, v 36, n 2-3, p.271-278, 1997.

- Vijayaraghvan, K. and Murthy, D.V.S., Effect of toxic substances in anaerobic treatment of tannery wastewater. Bioprocess Engineering 16, 3: 151 - 155., 1997.
- Watanabe, Y., Sugi, R., Tanaka, T., and Hayashida, S., Enzymatic Decolorization of Melanoidin by Coriolus sp. No. 20. Agric. Biol. Chem.,vol. 46(6), p.1623-1630, 1982.
- Wiemann M., Schenk, H. and Hegemann, W., Anaerobic treatment of tannery wastewater with simultaneous sulphide elimination. Water Research 32,3, p.774-780, 1998.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำ (เกรียงศักดิ์, 2539 ; กรรณิการ์, 2544)

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าสิ่งเจือปนในน้ำเสียมีหลายชนิด ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมและสะดวกในการวิเคราะห์สิ่งเจือปนดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ค่าที่สำคัญ และมักจะกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรทราบ

1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) หรือ (Positive potential of the hydrogen ions) เป็นค่าที่แสดงถึงภาวะความเป็นกรดและเบส ซึ่งสิ่งที่บ่งบอกความเป็นกรดคือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ และ สิ่งที่บ่งบอกความเป็นเบสคือ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[OH^-]$ เนื่องจากความเป็นกรด-เบสสเกลอยู่ในช่วง 0 ถึง 14 โดยสามารถแบ่งภาวะความเป็นกรด เบส และกลางได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อ ความเป็นกรด-เบสมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกลาง ถ้าค่าความเป็นกรด-เบสมีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นกรด หรือค่าความเป็นกรด-เบสมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นเบส โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายในสภาพปกติจะมีค่าในช่วง 6-8 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ค่าความเป็นกรด-เบสมีสมการดังนี้

$$pH = -\log[H^+]$$

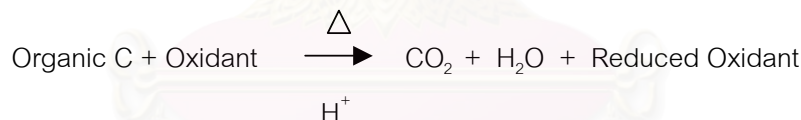
2. ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นการวัดความสามารถของน้ำที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน คุณสมบัติข้อนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ชนิดของไอออนในน้ำและอุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้านั้นไม่ได้เป็นค่าเฉพาะไอออนตัวใดตัวหนึ่ง แต่เป็นค่ารวมของไอออนทั้งหมดในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็แสดงว่ามีสารที่แตกตัวได้ในน้ำเพิ่มขึ้น และค่าการนำไฟฟ้าลดลงแสดงว่ามีสารที่แตกตัวได้ในน้ำลดลง

3. สี (Color) สีของน้ำตามธรรมชาติ เป็นผลจากการที่น้ำไหลผ่านสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ใบไม้ ใบหญ้า ซากสัตว์ เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะเป็นองค์ประกอบ เมื่อสลายตัวจะให้สารจำพวกแทนนิน กรดฮิวมิก และฮิวเมตซึ่งเป็นสารมีสี นอกจากนี้สีของน้ำอาจเกิดมาจากไอออนของโลหะจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น เนื่องจากสีในน้ำมักเป็นพวกคอลลอยด์ มีประจุโดยรวมเป็นลบ สีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- 1) สีจริง (True color) ซึ่งเป็นสีของน้ำที่ได้ทำการกำจัดความขุ่นออกไปแล้วโดยการเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge)
- 2) สีปรากฏ (Apparent color) เป็นสีที่เกิดขึ้นจากสารที่ละลายในน้ำรวมทั้งจากสารแขวนลอยในน้ำด้วย การหาสีปรากฏหาได้โดยตรงไม่ต้องผ่านการเซนตริฟิวจ์หรือการกรองก่อน

4. บีโอดี (BOD) หรือ (Biochemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ (Decomposable) ภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจน ผลพลอยได้จากการออกซิเดชันนี้ทำให้แบคทีเรียได้รับพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโต เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือแอมโมเนีย ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ค่าบีโอดีหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO: Dissolved Oxygen) ที่ถูกใช้ไปโดยจุลชีพ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ณ ปัจจุบัน เรียกว่า DO_0 และในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเวลา 5 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เรียกว่า DO_5

5. ซีโอดี (COD) หรือ (Chemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักที่ว่าสารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (มียกเว้นบางตัวเป็นส่วนน้อย) สามารถที่จะถูกออกซิไดส์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้ภาวะที่เป็นกรด ดังสมการ



จัดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมีความสกปรกที่เกิดจากสารอินทรีย์ อยู่ในระดับมากน้อยเพียงใด

6. ของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) ของแข็ง หมายถึงสารหรือสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านการนำน้ำออกแล้ว ไม่รวมถึงสารที่ระเหยไปกับน้ำ สิ่งที่เหลืออยู่หรือตะกอนมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายน้ำหรือไม่ละลายก็ได้ สามารถแบ่งของแข็งออกเป็นชนิดต่าง ๆ

- 1) ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) คือของแข็งส่วนที่ละลาย ในน้ำ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ต่างๆ หรืออินทรีย์สาร
- 2) ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำหรือของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Undissolved Solids หรือ Total Suspended Solids, TSS) แบ่งออกเป็น

- 2.1) Suspended Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ตะกอนมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา
- 2.2) Stable Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ตะกอนมีขนาดใหญ่และมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ เมื่อตั้งทิ้งไว้สามารถจะตกลงมานอนที่ก้นภาชนะได้
- 3) ของแข็งระเหย (Volatile Solids) คือของแข็งที่ระเหยได้เมื่อนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิสูง 550 – 600 องศาเซลเซียส
- 4) ของแข็งคงตัว (Fixed Solids) คือของแข็งหรือซีเมนต์ที่เหลือจากการเผาของแข็งที่อุณหภูมิสูง 550 – 600 องศาเซลเซียส



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)	5.5 – 9.0	pH Meter
2. ค่า TDS (Total Dissolved Solid)	- ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่า TDS ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง
5. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไทเทรต
6. ไสยาไนต์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
7. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้ว แต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
8. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric Method
12. ค่าบีโอดี 5 วันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
13. ค่าที่เคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	Kjeldahl
14. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestion

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
15. โลหะหนัก (Heavy Metal) 1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร	
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร	
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
11. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic absorption Cold Vapor Technique

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
12. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ. ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การหาค่าคุณสมบัติของน้ำเสีย

1. ความเป็นกรด-เบส (pH)

วิธีวิเคราะห์: วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง pH meter 7020 Electronic Instrument Limited

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

2. ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

วิธีวิเคราะห์: วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

3. สี (Color)

การวัดสีของน้ำเสียวิธีการหนึ่งคือ การใช้วิธีเปรียบเทียบโดยใช้หลอดเนสเลอร์ (Nessler tube) ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัดสีจะถูกเปรียบเทียบกับสารละลายสีมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น ในการวัดสีครั้งนี้ใช้เครื่อง Spectrophotometer ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance กับค่าหน่วยสีของสารละลายสีมาตรฐานซึ่งจะใช้เป็น Calibration Curve ในการหาหน่วยสีของน้ำเสียที่ต้องการวัด

อุปกรณ์ที่ใช้

1. UV Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V - 530
2. เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสารเคมีที่ใช้

สารเคมีที่ใช้

สารละลายสต็อกสีมาตรฐาน โดยละลายโพแทสเซียมคลอโรแพลทินेट (K_2PtCl_6) 1.246 กรัม และโคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 1.00 กรัม ในน้ำกลั่นซึ่งเติมกรดไฮโดรคลอริก 100 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายที่มีความเข้มของสีเท่ากับ 500 หน่วย

วิธีวิเคราะห์

แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่คือ

1. หาค่าความยาวคลื่นที่สารดูดกลืน (Spectrum measurement)
 - 1.1) เตรียมอนุกรมของสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 10, 20, 50, 100, 200, 300 และ 400 หน่วยสี ตามลำดับ โดยทำการเจือจางปริมาตรสารละลายสีต่อสีมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร
 - 1.2) นำอนุกรมสีทั้งหมดมาทำการวัดการดูดกลืน (Absorbance) ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer โดยใช้ค่าความยาวคลื่นในช่วงกว้างคือ 190-1100 นาโนเมตร การกำหนดช่วงการดูดกลืนแสงให้กว้างๆ เพื่อให้ได้รับข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมก่อนนำมาใช้เป็นค่าความยาวคลื่นที่ดีที่สุดของสารนั้น

2. การทำ Calibration curve (Quantitative analysis)
 - 2.1) เตรียมอนุกรมของสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 50 100 200 300 และ 400 หน่วยโดยทำการเจือจางปริมาตรสารละลายสีต่อสีมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร
 - 2.2) ทำการป้อนค่าความเข้มข้นของหน่วยสีข้างต้น และวัดค่าการดูดกลืนต่างๆ
 - 2.3) นำข้อมูลที่ได้ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนไปสร้างกราฟมาตรฐาน จะได้สมการการดูดกลืนของแสง และค่าคงที่ต่างๆ

3. การวัดน้ำตัวอย่างที่ไม่ทราบความเข้มข้น (Fixed wavelength)
 - 3.1) ทำการป้อนค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนของสารนั้นและติดตั้งระบบเครื่อง Auto zero ให้เรียบร้อย
 - 3.2) นำตัวอย่างที่นำมาวัดการดูดกลืนแสงควรผ่านการเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนออกที่ความเร็วรอบ 10000 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 15 นาที
 - 3.3) วัดค่าการดูดกลืนแสงและนำมาคำนวณความเข้มข้นจากสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

ข้อเสนอแนะ

ก่อนการวัดด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer น้ำตัวอย่างควรผ่านการเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางก่อน

4. การวิเคราะห์หาของแข็งทั้งหมด (TS)

ตัวอย่างน้ำที่ผสมเข้ากันอย่างดีในถ้วยระเหยซึ่งทราบน้ำหนักจะถูกนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วนำไปอบที่ $103 - 105^{\circ}\text{C}$ ทำให้เย็นและชั่งน้ำหนัก น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในน้ำ

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ถ้วยระเหย
- 2) เครื่องชั่งน้ำ
- 3) โถทำแห้ง
- 4) ตู้อบ
- 5) ตาชั่งละเอียด

วิธีวิเคราะห์

- 1) นำถ้วยระเหยไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $103 - 105^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชม. ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง
- 2) นำถ้วยระเหยมาชั่งน้ำหนัก สมมุติมีน้ำหนัก A กรัม
- 3) เขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันอย่างดี เทตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนลงในถ้วยระเหย ด้วยปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้ นั้น จะต้องทำให้เหลือกากแห้งภายหลังการอบอยู่ในช่วง 10 – 200 มก.
- 4) นำถ้วยระเหยที่ใส่ตัวอย่างน้ำมาระเหยในเครื่องชั่งน้ำจนแห้ง และนำเข้าตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ $103 - 105^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชม.
- 5) นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนัก สมมุติมีน้ำหนัก B กรัม
- 6) ทำการอบซ้ำ จนได้น้ำหนักคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยกว่า 4% ของน้ำหนักหนักก่อน

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (มก./ล)} = \frac{(B - A)}{C} \cdot x 10^6$$

- A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว, กรัม
 B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง, กรัม
 C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ, มล.

5. การวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ของแข็งที่แขวนลอยทั้งหมดหมายถึงส่วนของของแข็งที่เหลือค้างอยู่บนกระดาษกรองใยแก้วหลังจากการกรองน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสและทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 2) ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 -105 องศาเซลเซียส
- 3) เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 4) กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร
- 5) เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
- 6) ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีวิเคราะห์

- 1) นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 2) ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง GF/C สมมุติมีน้ำหนัก A กรัม
- 3) ต่อชุดเครื่องมือสำหรับกรอง ใช้ปากคีบกระดาษกรอง GF/C วางบนกรวยบุคเนอริ์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง โดยใช้ครั้งละ 20 มิลลิลิตร เปิดเครื่องดูดสุญญากาศต่อให้ดูดนํ้าออกจนแห้ง ทิ้งนํ้าล้างไป
- 4) เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำที่จะใช้ ซึ่งควรเลือกให้มีค่าของแข็งแขวนลอยที่ติดบนกระดาษกรองไม่เกิน 200 มิลลิกรัม และไม่ควรถ่ำกว่า 1 มิลลิกรัมเมื่อเลือกปริมาตรแล้ว ทำการเขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันอย่างดี เทตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรกรองโดยค่อย ๆ เททีละน้อยอย่างต่อเนื่องจนหมด ใช้นํ้ากลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวงตัวอย่าง และฉีดนํ้ากลั่นที่ด้านข้างของกรวยบุคเนอริ์รวมทั้งบนกระดาษกรอง GF/C ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศดูดนํ้าออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
- 5) นำกระดาษกรองใยแก้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส อย่างน้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมุติมีน้ำหนัก B กรัม
- 6) ทำข้อ 5 ซ้ำ จนได้น้ำหนักคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยกว่า 4% ของน้ำหนักครั้งก่อน

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A)}{C} \times 10^6$$

A = น้ำหนักกระดาษกรองอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

6. การวิเคราะห์หาของแข็งละลายน้ำ (TDS)

หมายถึง ส่วนของน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วจึงนำไปอบแห้งที่ 103 -105 องศาเซลเซียส น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 2) ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส
- 3) เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 4) กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร
- 5) เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
- 6) ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีวิเคราะห์

- 1) นำน้ำตัวอย่างมากรองเอาสารแขวนลอยออกทั้งหมดก่อนโดยกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและเครื่องกรองสุญญากาศ
- 2) นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ถ้วยระเหยนำไปอบแห้งที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นชั่งหาน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A)}{C} \times 10^6$$

A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)

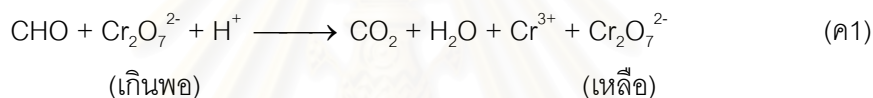
C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

7. การวิเคราะห์หาซีไอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric method)

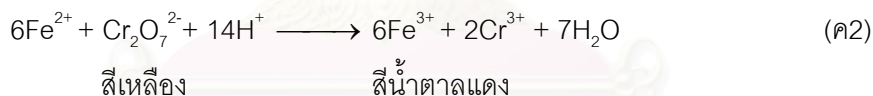
สำหรับการวิเคราะห์ COD มี 2 แบบ คือวิธีฟลักซ์แบบปิดและวิธีฟลักซ์แบบเปิด แต่ในการทดลองจะใช้วิธีฟลักซ์แบบปิด โดยมีหลักการดังนี้

ภายใต้สภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดส์โดยสารละลายโปตัสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์แล้ว ทำการวัดปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยนำไปไทเทรตกับเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate, FAS) และใช้เฟอโรอิน (Ferriin) เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ทราบปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดส์ สารอินทรีย์ได้ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

เมื่อรีฟลักซ์ด้วย $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$



หาปริมาณ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ที่เหลือโดยการไทเทรตด้วย FAS ที่มีเฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์



$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} (FAS) ได้โครมิก (Cr^{3+}) จนหมด แล้ว Fe^{2+} จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอินได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไทเทรต

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 20 x150 หรือ 25 x150 มิลลิเมตร มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วยมีทีเฟอ
- 2) บล็อก (Block) หรือที่ใส่หลอดแก้วแบบตัน ทำด้วยอลูมิเนียม ความลึกของช่องใส่หลอดประมาณ 45 - 50 มิลลิเมตร การให้ความร้อนเพื่อต้มย่อยสลายกระทำโดยวางบล็อกบนเตาแผ่น
- 3) ตู้อบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
- 4) บิวเรต

5) ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร

สารเคมี

- 1) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล
 - นำ $K_2Cr_2O_7$ อบที่ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้งซึ่งน้ำหนัก $K_2Cr_2O_7$ มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร
- 2) กรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. sulfuric acid with silver sulfate)
 - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัม เติมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1 - 2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย
- 3) สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตไทแทนต์ (Ferrous ammonium sulfate titrant) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล
 - ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) ชนิด AR. Grade ประมาณ 19.6 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเจือจาง 1000 มิลลิลิตร
 - สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize) ก่อนใช้ทุกครั้ง ด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ทำได้ดังนี้คือนำ $K_2Cr_2O_7$ 5 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้เฟอโรอิน (Ferroun) จำนวน 2 - 3 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง
- 4) สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator)
- 5) สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไฮโดรเจนฟธาเนต (Potassium Hydrogen Phthalate หรือ KHP)
 - ชั่ง KHP จำนวน 425 มิลลิกรัมที่บดแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ละลายด้วยในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตรสารละลายนี้จะมีค่าซีไอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปกติเก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 เดือน)

วิธีวิเคราะห์

- 1) ต้องล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 20% เสมอทุกครั้งก่อนใช้งาน
- 2) เลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มซีไอดีที่เหมาะสม
- 3) ถ้าตัวอย่างน้ำมีซีไอดีต่ำให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิเมตร) และถ้าซีไอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิเมตร)
- 4) การเลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำ ถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติหรือน้ำที่มีค่าซีไอดีต่ำๆ (<40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ควรใช้ตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิเมตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร แต่ถ้าซีไอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20 x 150 โดยเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำมากที่สุด 5 มิลลิเมตร หรือใช้น้อยกว่า แล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิเมตร และถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีสูงมากต้องเจาะจงต้องเจาะจงตัวอย่างน้ำก่อนนำมาใช้ การเลือกขนาดตัวอย่างน้ำที่จะใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจดูได้จากตารางที่ ค1
- 5) ใส่ตัวอย่างลงในหลอดแก้วขนาดเหมาะสม เติมน้ำย่าย่อยสลายหรือโปตัสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ ค2 ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสมกันให้ดี สำหรับแบลนด์ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง
- 6) วางหลอดแก้วในบลิ๊อคแล้วใส่ตู้อบ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 7) เมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้ว นำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็น
- 8) เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลาย
- 9) ในหลอดแก้วให้หมดแล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรซีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจาก สีเหลือง \longrightarrow เขียวอมเหลือง \longrightarrow ฟ้ำ \longrightarrow น้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จุดปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรต

ข้อเสนอแนะ

- 1) น้ำตัวอย่างที่นำมาวัดหาค่า COD ควรผ่านการเหยียงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาทีเป็นเวลานาน 10 นาที

- 2) นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการเหวี่ยงแล้ว มาใช้ในการทดลองถ้ำน้ำตัวอย่างที่มีความสกปรกสูงหรือมีความเข้มข้นสูงต้องทำการเจือจางตามสัดส่วนของตาราง ค (1) แล้วจึงนำมาใช้ในการทดลองลำดับต่อไปได้

ตารางที่ ค (1) ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาซีโอดี*

ช่วงซีโอดี	ขนาดตัวอย่าง(มิลลิลิตร)	อัตราเจือจาง
<200	5	1 : 1
200 - 400	4	1 : 1
400 - 800	2	1 : 1
800 - 1600	1	1 : 1
1600 - 3200	5	1 : 10
2700 - 5300	3	1 : 10
4000 - 8000	4	1 : 20
8000 - 16000	2	1 : 20
13000 - 26500	3	1 : 50
20000 - 40000	2	1 : 50
40000 - 80000	2	1 : 100
80000 - 160000	1	1 : 100

* เมื่อใช้ FAS ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ $K_2Cr_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ตารางที่ ค (2) ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

ขนาดหลอดแก้ว (มิลลิลิตร)	ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)	สารละลายไดโครเมต (มิลลิลิตร)	สารละลายกรดซัลฟิวริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตรทั้งหมด (มิลลิลิตร)
16 x 100	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150	10.0	6.0	14.0	30.0

การคำนวณ

$$\text{ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}} \times 10^6$$

- เมื่อ
- A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับ Blank (มิลลิลิตร)
 - B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)
 - V = ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

7. การวิเคราะห์หาบีโอดี

การวิเคราะห์ BOD วิธีการวิเคราะห์มี 2 วิธี คือ วิธีแบบโดยตรงและวิธีแบบโดยเจือจาง แต่ในการทดลองจะใช้วิธีแบบโดยเจือจาง ซึ่งวิธีแบบโดยเจือจางแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

วิธีแบบเจือจางใช้สำหรับตัวอย่างที่มีความสกปรก เช่น มีค่าบีโอดีเกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนั้น เมื่อตัวอย่างน้ำมีสารอินทรีย์จำนวนมาก จึงต้องเจือจางตัวอย่างเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอที่แบคทีเรียจะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้น ซึ่งวิธีแบบเจือจางจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือไม่ต้องเติมหัวเชื้อและต้องเติมหัวเชื้อ ในการทดลองเลือกแบบไม่ต้องเติมหัวเชื้อ

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250 – 300 มิลลิลิตรพร้อมจุกปิดสนิท
- 2) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียสและต้องมี
- 3) อุปกรณ์และเครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระบอกตวง บิวเรต ขวดรูปชมพู่ เป็นต้น
- 4) เครื่องจ่ายลม แบบเดียวกันกับที่ใช้กับตู้เลี้ยงปลาสวยงามและหัวลูกพู่ (หัวจ่ายลม)

สารเคมี

- 1) น้ำกลั่น
 - ต้องมีคุณภาพสูง ควรมีทองแดงน้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ปราศจากการคลอรีน คลอรามีน สารอินทรีย์ กรด – เบส ต้องเป็นกลาง
- 2) สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.2

- ละลายโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 8.5 กรัม ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 21.75 กรัม แอมเนี่ยมคลอไรด์ (NH_4Cl) 17.2 กรัม และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 33.4 กรัมและในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
- 3) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
 - ละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 22.5 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
- 4) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์
 - ละลายแคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous CaCl_2) จำนวน 27.5 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
- 5) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์
 - ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
- 6) สารละลายแมงกานีสซัลเฟต
 - ละลายแมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 364 กรัม หรือแมงกานีสซัลเฟตเตตระไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 480 กรัมหรือแมงกานีสซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 400 กรัมในน้ำกลั่น กรองแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
- 7) สารละลายอัลคาไล-ไฮโดรอกไซด์-เฮไลด์
 - ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 กรัมและโซเดียมไอโอดาอิด (NaI) 135 กรัมในน้ำกลั่นเจือจางให้ได้ 950 มิลลิลิตรและทำให้เย็น จากนั้นค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมเฮไลด์ (NaN_3) ที่ละลายในน้ำ 40 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดและเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร
- 8) สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล
 - ละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 24.82 กรัมในน้ำต้มที่เย็นแล้ว เติมคลอโรฟอร์ม 5 มิลลิลิตรหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัมเพื่อเก็บไว้ใช้นาน ๆ ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เมื่อใช้งานให้เจือจางเป็น 0.025 นอร์มัล
- 9) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
- 10) น้ำแป้ง

วิธีวิเคราะห์แบบเจือจางที่ไม่ต้องเติมหัวเชื้อ Seed

- 1) การเตรียมน้ำเจือจาง โดยนำกลั่นมาเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารเคมีข้อ 2 - 5 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร
- 2) การเลือกปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ ถ้าไม่ทราบค่าบีโอดีโดยประมาณของตัวอย่างน้ำ ต้องหาซีโอดีก่อนหรืออาจจะดูจากค่า Rapid COD (ซีโอดีอย่างง่าย) พร้อมกับพิจารณาลักษณะของตัวอย่างน้ำ แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำร่วมด้วย เพื่อกะประมาณค่าซีโอดี เช่น น้ำตัวอย่างที่มีค่าของแข็งละลายมาก ควรจะมีค่าบีโอดี ระหว่าง 100 -300 มิลลิกรัมต่อลิตร การเลือกปริมาณตัวอย่างนิยมเลือกให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควรจะมีการใช้ออกซิเจนอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทราบค่าบีโอดีโดยประมาณ ควรเลือกปริมาณตัวอย่างที่คาดว่าจะให้ค่าบีโอดีอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้วจึงเลือกปริมาณตัวอย่างที่ใช้ให้สูงและต่ำกว่าที่อยู่ติดกันตามตารางที่ ค (3) เช่น ปริมาณค่าบีโอดีไว้ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเลือกใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 มิลลิกรัม เลือกสูงขึ้นเป็น 5 มิลลิลิตรและต่ำลงเป็น 20 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค (3) การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี

ปริมาณตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ช่วงบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อัตราเจือจาง
0.02	30,000 - 105,000	15,000
0.05	12,000 - 42,000	6,000
0.10	6,000 - 21,000	3,000
0.20	3,000 - 10,500	1,500
0.50	1,200 - 4,200	600
1.0	600 - 2,100	300
2.0	300 - 1,050	150
5.0	120 - 420	60
10.0	60 - 210	30
20.0	30 - 105	15
50.0	12 - 42	6
100	6 - 21	3
300	0 - 7	1

- หมายเหตุ** ถ้าปริมาณตัวอย่างที่ใช้น้อยกว่า 1.0 มิลลิลิตร ควรเจือจางตัวอย่างก่อนปิเปตใส่ขวดปิโอดี
- 3) ปิเปตตัวอย่างตามจำนวนที่เลือกไว้ลงในขวดปิโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร อย่างละ 2 ขวด
 - 4) เติมน้ำสำหรับใช้เจือจางจนเต็มขวดปิโอดี ต้องระมัดระวังพยายามอย่าให้เกิดฟองอากาศ ปิดฝาให้แน่น
 - 5) นำขวดปิโอดีขวดหนึ่งของแต่ละปริมาณที่เลือกมาหาค่าออกซิเจนละลายที่มีเริ่มต้น สมมุติเป็น DO_0 ส่วนอีกขวดนำไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
 - 6) เมื่อครบ 5 วัน นำขวดปิโอดีที่บ่มไว้มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่ เรียกว่า DO_5

การวิเคราะห์ค่า DO

- 1) เก็บน้ำตัวอย่างวิธีการเก็บน้ำตัวอย่าง ลงในขวดปิโอดี ให้เต็มขวดพร้อมปิดจุก
- 2) เติมสารละลาย $MnSO_4$ 1.0 มิลลิลิตร และสารละลายอัลคาไล - ไอโอไดต์ - เอไซด์ 1.0 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปตวัดปริมาตรและจุ่มลงใต้ผิวน้ำตัวอย่าง ปิดจุกอย่างระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ เขย่าโดยคว่ำขึ้น - ลง แรง ๆ หลาย ๆ ครั้ง ให้ผสมเข้ากันปล่อยให้เกิดการตกตะกอนและเขย่าใหม่ซ้ำอีกครั้ง
- 3) เมื่อตกตะกอนได้ส่วนใหญ่มากกว่า 100 มิลลิลิตร เปิดจุกและค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 2.0 มิลลิลิตร ให้ไหลรินตามตอขวดปิโอดี
- 4) ปิดจุกและทำการเขย่าคว่ำขึ้น - ลง จนเห็นไอโอดีนกระจายทั่ว (I_2 มีสีเหลืองแกมน้ำตาล) และตะกอนละลายหมด
- 5) ปิเปตใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 203 มิลลิลิตร* นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล เมื่อสารละลายได้สีเหลืองฟางให้เติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ 1 - 2 มิลลิลิตรและไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป

การคำนวณ $DO_{(ppm)} = (\text{ปริมาตรของ } 0.025 \text{ นอร์มัลของโซเดียมไทโอซัลเฟต} \times 0.2 / 200) \times 1000$

การคำนวณค่าบีโอดี

$$\text{BOD (มิลลิลิตรออกซิเจนต่อลิตร)} = (\text{DO}_0 - \text{DO}_5) \times \text{อัตราส่วนเจือจาง}$$

เมื่อ DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันแรก

DO_5 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันที่ 5

$$\text{อัตราเจือจาง} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำเต็มขวดบีโอดี (300 มิลลิลิตร)}}{\text{ปริมาณตัวอย่างที่ใช้}}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

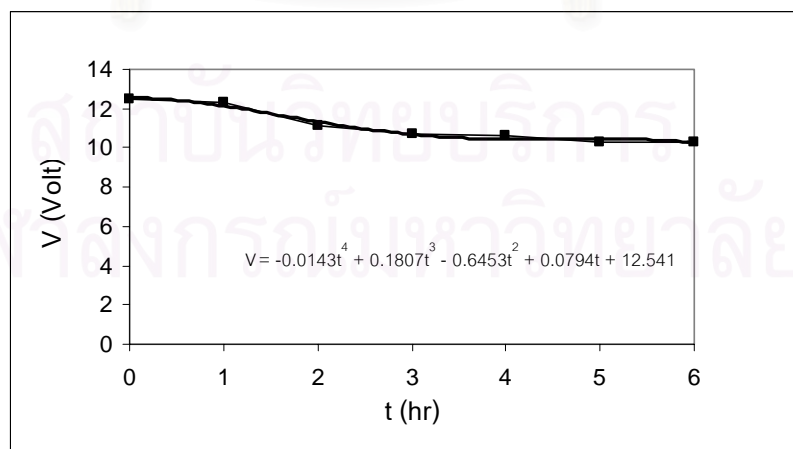
ง. การคำนวณต้นทุนในการดำเนินงาน

ง.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูปทรงแบบพัลส์ สำหรับระบบกะ

ให้	ค่ากระแสไฟฟ้า (Electricity cost)	= 1.66	บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง
	ค่าสารเคมี (Chemical substance of cost)		
	ค่าโซเดียมคลอไรด์	= 0.015	บาทต่อกรัม
	ค่าอลูมิเนียมซัลเฟต	= 0.005	บาทต่อกรัม
	ค่าน้ำประปา (Water cost)	= 13	บาทต่อลูกบาศก์เมตร
	อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา	37 บาทต่อ 1 เหรียญสหรัฐ	

พิจารณาจากค่าใช้จ่าย สำหรับการบำบัดที่ภาวะดีที่สุดในระบบแบบกะ ซึ่งให้ค่าการลดลงของสีร้อยละ 98 ภาวะที่ใช้คือ

กระแสไฟฟ้า (i)	= 10	แอมแปร์
ปริมาณน้ำตัวอย่าง (W)	= 8	ลิตร
เวลา (t)	= 6	ชั่วโมง



รูปแสดงค่าความต่างศักย์กับเวลา ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 10 แอมแปร์ ในระบบกะ

$$\text{โซเดียมคลอไรด์} = 10 \quad \text{กรัมต่อลิตร}$$

$$\text{อลูมิเนียมซัลเฟต} = 4 \quad \text{กรัมต่อลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{- กำลังไฟฟ้า (Electricity consumption)} &= (i) \times \int_0^6 V dt \\ &= (10) \times (66.52) \quad \text{วัตต์-ชั่วโมง} \\ &= \frac{(10) \times (66.52)}{1000} \quad \text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\ &= \frac{(10) \times (66.52)}{(1000) \times (8)} \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง}}{\text{ลิตร}} \\ &= \frac{(10) \times (66.52) \times (1000)}{(1000) \times (8) \times (1)} \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง-ลิตร}}{\text{ลิตร-ลูกบาศก์เมตร}} \\ &= 83.15 \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost)} &= \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} \\ &= 83.15 \times 1.66 \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง-บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร-กิโลวัตต์-ชั่วโมง}} \\ &= 138.03 \quad \frac{\text{บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- ค่าสารเคมี (Chemical substance of cost)} &= \text{ค่าโซเดียมคลอไรด์} + \text{ค่าอลูมิเนียมซัลเฟต} \\ &= (1000 \times 10 \times 0.015) + (1000 \times 4 \times 0.005) \quad \frac{\text{ลิตร-กรัม-บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร-ลิตร-กรัม}} \\ &= 150 + 20 = 170 \quad \frac{\text{บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- ค่าน้ำประปา (Water cost)} &= 0.9 \times 13 = 11.7 \quad \frac{\text{บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}} \end{aligned}$$

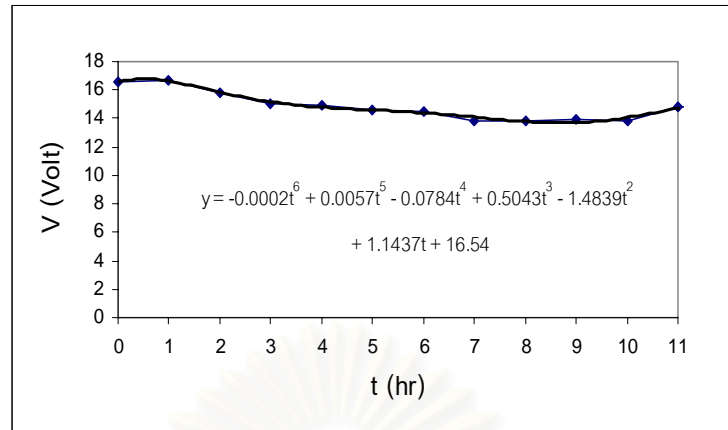
$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนในการดำเนินงาน} &= \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} + \text{ค่าสารเคมี} + \text{ค่าน้ำประปา} \\
 &= 138.03 + 170 + 11.7 \\
 &= 319.73 \quad \frac{\text{บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}} \\
 &= 8.64 \quad \frac{\text{เหรียญสหรัฐ}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}}
 \end{aligned}$$

ง.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์ สำหรับระบบแบบต่อเนื่อง

ให้	ค่ากระแสไฟฟ้า (Electricity cost)	= 2.50	บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง
	ค่าสารเคมี (Chemical substance of cost)		
	โซเดียมคลอไรด์	= 0.015	บาทต่อกรัม
	อลูมิเนียมซัลเฟต	= 0.005	บาทต่อกรัม
	ค่าน้ำประปา (Water cost)	= 13	บาทต่อลูกบาศก์เมตร
	อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา 37 บาทต่อ 1 เหรียญสหรัฐ		

พิจารณาจากค่าใช้จ่าย สำหรับการบำบัดที่ภาวะที่ดีที่สุดในระบบแบบต่อเนื่อง เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ ซึ่งให้ค่าการลดลงของสีร้อยละ 79 ภาวะที่ใช้คือ

อัตราการไหลผ่าน flow meter	= 0.5	ลิตรต่อชั่วโมง
กระแสไฟฟ้า (i)	= 10	แอมแปร์
ปริมาณน้ำตัวอย่าง (W)	= 5.5	ลิตร
เวลา (t)	= 11	ชั่วโมง
โซเดียมคลอไรด์	= 5	กรัมต่อลิตร
อลูมิเนียมซัลเฟต	= 4	กรัมต่อลิตร



รูปแสดงค่าความต่างศักย์กับเวลา ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 10 แอมแปร์ และ อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ในระบบแบบต่อเนื่อง

$$\begin{aligned}
 \text{- กำลังไฟฟ้า (Electricity consumption)} &= (i) \times \int_0^6 V dt \\
 &= (10) \times (39.57) \quad \text{วัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= \frac{(10) \times (39.57)}{1000} \quad \text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= \frac{(10) \times (39.57)}{(1000) \times (5.5)} \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง}}{\text{ลิตร}} \\
 &= \frac{(10) \times (39.57) \times (1000)}{(1000) \times (5.5) \times (1)} \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง-ลิตร}}{\text{ลิตร-ลูกบาศก์เมตร}} \\
 &= 71.94 \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost)} &= \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} \\
 &= 71.94 \times 1.66 \quad \frac{\text{กิโลวัตต์-ชั่วโมง-บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร-กิโลวัตต์-ชั่วโมง}} \\
 &= 119.42 \quad \frac{\text{บาท}}{\text{ลูกบาศก์เมตร}}
 \end{aligned}$$

- ค่าสารเคมี (Chemical substance of cost)

$$= \text{ค่าโซเดียมคลอไรด์} + \text{ค่าอลูมิเนียมซัลเฟต}$$

$$= (1000 \times 5 \times 0.015) + (1000 \times 4 \times 0.005)$$

$$= 75 + 20 = 95$$

ลิตร-กรัม-บาท
ลูกบาศก์เมตร-ลิตร-กรัม

บาท

ลูกบาศก์เมตร

- ค่าน้ำประปา (Water cost) = $0.9 \times 13 = 11.7$

บาท
ลูกบาศก์เมตร

ต้นทุนในการดำเนินงาน = ค่ากระแสไฟฟ้า + ค่าสารเคมี + ค่าน้ำประปา

$$= 119.42 + 95 + 11.7$$

$$= 226.12$$

บาท
ลูกบาศก์เมตร

$$= 6.11$$

เหรียญสหรัฐ
ลูกบาศก์เมตร

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบัณฑิต เลิศประชานุรักษ์ เกิดวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย