



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักฟิมพ์โดยกระบวนการโอโซนชั้น ร่วมกับการลอยตะกอน
ด้วยหลักการละลายของอากาศ

โดย นางสาวอรชуда ชันดีกุล

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

13 ตุลาคม 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์พร ผลากรกุล)

กรรมการ

(ดร.จินดารัตน์ พิมพ์สมาน)

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนซึ่งร่วมกับการลอยตะกอน
ด้วยหลักการละลายของอากาศ

นางสาวอรชุดา ชันดีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-19-0862-8

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

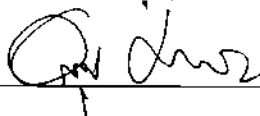
ชื่อ : นางสาวอรชุดา ชันดีกุล
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนแห้ง
ร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ
สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี และการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ ด้วยกระบวนการโอโซนแห้งร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อการลดลงของสีของน้ำเสีย คือ ภาระสารอินทรีย์ ค่าพีเอช และเวลาที่ใช้ในการโอโซนแห้ง โดยภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง อยู่ระหว่าง 650-1,950 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช อยู่ระหว่าง 3-11 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนแห้ง อยู่ระหว่าง 10-60 นาที และตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น คือ อัตราส่วนวอเตอร์ (ปริมาณน้ำจากถังความดัน/ปริมาณสารแขวนลอย) ค่าพีเอชและเวลาในการโอโซนแห้ง โดยอัตราส่วนวอเตอร์ อยู่ระหว่าง 0.05-0.3 พีเอช อยู่ระหว่าง 3-11 และเวลาในการโอโซนแห้ง อยู่ระหว่าง 25-60 นาที ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องผลิตโอโซนคงที่เท่ากับ 700 มิลลิลิตร/นาที และปริมาณของโอโซนที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซน เท่ากับ 26.2 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช และเวลาที่ใช้ในการโอโซนแห้ง แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสีย และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนวอเตอร์ ค่าพีเอชและเวลาในการโอโซนแห้ง นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เท่ากับ 100 % คือ ภาระสารอินทรีย์ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 8.7 และเวลา 20 นาที ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสี มีความแตกต่างน้อยกว่า 1.5 % และสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น เท่ากับ 68 % คือ อัตราส่วนวอเตอร์ 0.3 ค่าพีเอช 7.3 และเวลา 60 นาที ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีความแตกต่าง 0.64 %

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 113 หน้า)

คำสำคัญ : โอโซนแห้ง, การลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ, การกำจัดสี,
การกำจัดความขุ่น, การออกแบบส่วนประสมกลาง



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

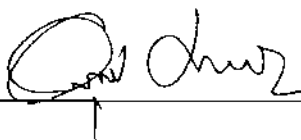
Name : Miss Ornchuda Khunteegul
Thesis Title : Ink Wastewater Treatment by Ozonation Combined with Dissolved
Air Flotation (DAF) Processes
Major Field : Chemical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Anurak Petiraksakul
Academic Year : 2006

Abstract

The objective of this research is to study on the optimum condition of the color and turbidity removal of ink wastewater by ozonation combined with DAF. Central composite design was applied with three independent variables which effect on color removal namely, organic loading, pH and reaction time in the ranges of 650-1,950 mg/l, 3-11 and 10-60 min., respectively. Three independent variables which effect on turbidity removal namely, volume ratio (VR), defined as the ratio of pressurized water volume and influent volume, pH and reaction time were in the ranges of 0.05-0.3, 3-11 and 25-60 min., respectively. Constant air flow rate of 700 cm³/min and ozone dose of 26.2 mg/h are generated from an ozone generator. Statistic analysis indicated that the decoloration efficiencies were increased with increasing pH and the reaction time while the efficiencies were decreased with increasing the organic loading. Turbidity removal efficiencies were increased with increasing VR, pH and reaction time. Statistic analysis also indicated that the optimum decoloration process condition was organic loading of 650 mg/l, pH of 8.7 and treatment time of 20 min. Verification results at this condition gave an error less than 1.5 %. The optimum turbidity removal process condition was VR of 0.3, pH of 7.3 and treatment time of 60 min. Verification results at this condition also gave an error less than 0.64 %.

(Total 113 pages)

Keywords : Ozonation, DAF, decoloration, turbidity removal, Central composite design



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัย อันเป็นประโยชน์ของการวิจัยครั้งนี้ มาโดยตลอด

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัย เพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอขอบพระคุณ บริษัทอินเตอร์อิง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หมึกเฟล็กซ์ เพื่อใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ธุรการ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจ และให้ความสนับสนุนในด้านทุนการศึกษามาโดยตลอด หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก่อให้เกิดประโยชน์แก่ท่านผู้ใด ผู้วิจัยขอมอบความดีทั้งปวงให้แก่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ช่วยส่งเสริมให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ จนสำเร็จการศึกษา

อรชุดา ชันดีกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 น้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย	5
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	5
2.3 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย	6
2.4 ลักษณะพื้นฐานของโอโซน	7
2.5 ความเป็นพิษของโอโซนต่อมนุษย์	8
2.6 การละลายของโอโซนในน้ำ (Solubility of Ozone in Water)	8
2.7 การเกิดโอโซน	10
2.8 การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์	12
2.9 การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน	17
2.10 การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ	20
2.11 การลอยตะกอน	28
2.12 เสถียรภาพของคอลลอยด์	39
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	51
3.1 รูปแบบการวิจัย	51
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	51
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	55
3.4 เก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสีย	56
3.5 วิธีการทดลอง	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์การทดลอง	67
4.1 ปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน	67
4.2 คุณภาพน้ำเสีย	67
4.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวผลตอบ	67
4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสม	82
4.5 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและกำจัดความขุ่น	86
4.6 ผลของพีเอชต่อค่าศักยภาพซีดี	88
4.7 ผลของภาวะสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี	89
4.8 ผลของอัตราส่วนวีอาร์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น	90
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	91
5.1 สรุปผลการทดลอง	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก ก	97
การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	98
ภาคผนวก ข	105
ผลการทดลอง	106
ประวัติผู้วิจัย	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารออกซิแดนท์ต่างๆ	7
2-2 การละลายของโอโซนและออกซิเจนในน้ำตามกฎของเฮนรี	9
2-3 ชนิดของสารที่เป็นตัวริเริ่ม (Initiator) ,ตัวกระตุ้น (Promotor) และตัวยับยั้ง (Scavenger) สำหรับการสลายตัวของโอโซนในน้ำ	16
2-4 การเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนัก	20
2-5 การออกแบบส่วนประสมกลาง	22
3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว	59
3-2 การออกแบบส่วนประสมกลางในการทดลองส่วนที่ 1 สำหรับตัวแปรอิสระ 3 ตัว	60
3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว	62
3-4 การออกแบบส่วนประสมกลางในการทดลองส่วนที่ 2 สำหรับตัวแปรอิสระ 3 ตัว	62
4-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยมีระดับนัยสำคัญที่ 0.05	68
4-2 การเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายของแบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพในการกำจัดสี	71
4-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยมีระดับนัยสำคัญที่ 0.05	75
4-4 การเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายของแบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น	78
4-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าศักยภาพ	79
4-6 การเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายของแบบจำลองการถดถอยของค่าศักยภาพ	82
4-7 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนขึ้นรวมกับการลอยตะกอน	83
4-8 การเปรียบเทียบค่าผลตอบจากการวิเคราะห์ทางสถิติและผลการทดลอง	83
4-9 สภาวะที่เหมาะสมตามแบบจำลองที่ค่าพีเอช เท่ากับ 7.3	86
ข-1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย	106
ข-2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เวลาในการโอโซนขึ้นต่าง ๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,940 มิลลิกรัม/ลิตร และพีเอช เท่ากับ 4.3	107
ข-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่สภาวะต่างๆ	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและความขุ่นที่เวลาในการโอโซนเนชั่นต่างๆ ที่ซีโอดีเท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความขุ่นเริ่มต้น เท่ากับ 22 N.T.U. พีเอช เท่ากับ 4.2 ทดลองที่อัตราส่วนวอเตอร์ เท่ากับ 25%	109
ข-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่อัตราส่วนวอเตอร์ต่างๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความขุ่นเริ่มต้น เท่ากับ 22 N.T.U. พีเอช เท่ากับ 4.2 เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 60 นาที	110
ข-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นหลังลอยตะกอนที่อัตราส่วนวอเตอร์ต่างๆ ที่ซีโอดีเท่ากับ 1,310 ความขุ่นเริ่มต้น เท่ากับ 11.6 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.1 เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 30 นาที	110
ข-7 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ลอยตะกอนที่สภาวะต่างๆที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความขุ่นเริ่มต้น เท่ากับ 22 N.T.U. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 4.2	111
ข-8 ผลของศักย์ซีต้าที่สภาวะต่างๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช เริ่มต้นเท่ากับ 4.2 ศักย์ซีต้าเริ่มต้น เท่ากับ 7.8 มิลลิโวลล์	112

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 โครงสร้างของสื่อน้ำ โซลิดดิฟิเคชัน	3
2-1 การละลายของไอออนในน้ำ	9
2-2 การผลิตไอออนแบบวิธีอัลตราไวโอเลต	10
2-3 รูปแบบเครื่องผลิตไอออนแบบวิธีโครมาโตกราฟี	11
2-4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไอออนชั้นทั้งทางตรงและทางอ้อม S = Scavenger , R = Reaction product , M = Micropollutant	13
2-5 กราฟเส้นโครงสร้างของพื้นผิวผลตอบ	21
2-6 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 3$	22
2-7 ตัวอย่างกราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้างของแบบจำลองที่ดี	26
2-8 ระบบลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ	30
2-9 ระบบอัดอากาศแบบฟูลสตรีม	30
2-10 ระบบอัดอากาศแบบสปริงสตรีม	31
2-11 ระบบอัดอากาศแบบรีไซเคิลสตรีม	32
2-12 ระบบอัดอากาศแบบคาลินวอเตอร์	32
2-13 ระบบลอยตะกอนแบบดีสเพอร์เซอร์	33
2-14 ระบบลอยตะกอนแบบฟรอก	34
2-15 ระบบลอยตะกอนแบบอิเล็กโทรไลติก	34
2-16 ระบบลอยตะกอนแบบสูญญากาศ	35
2-17 การยึดติดของฟองอากาศบนตะกอนแขวนลอย	37
2-18 การจัดยึดทางกายภาพของฟองอากาศ	38
2-19 การดูดซับของฟองก๊าซขณะที่เกิดตะกอน	38
2-20 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์และระยะทางระหว่างอนุภาค	41
2-21 ประจุบนผิวที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่กรด	42
2-22 ประจุบนผิวที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่เบส	42
2-23 ประจุบนผิวที่เกิดจากการแตกตัวของไอออนสาร	43
2-24 ประจุบนผิวที่เกิดจากการดูดซับไอออนของสารลดแรงตึงผิวชนิดบวก	43
2-25 ประจุบนผิวที่เกิดจากการดูดซับไอออนของสารลดแรงตึงผิวชนิดลบ	43
2-26 แรงสเตอร์ริก	44
2-27 ชั้นของประจุที่ล้อมรอบอนุภาค (Electrical Double Layer)	45
2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ซีต้าและพีเอช	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-1 ระบบบำบัดด้วยโอโซนที่ใช้ในงานวิจัย	52
3-2 ระบบบำบัดด้วยโอโซนรวมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศที่ใช้ในงานวิจัย	52
3-3 แผนผังระบบบำบัดด้วยโอโซน	54
3-4 แผนผังระบบบำบัดด้วยโอโซนรวมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ	54
3-5 แผนผังระบบบำบัดขั้นต้นของโรงงานอินเตอร์อิง	57
4-1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เวลาในการโอโซนเนชั่นต่างๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,940 มิลลิกรัม/ลิตร และพีเอช เท่ากับ 4.3	68
4-2 กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้างของแบบจำลองของประสิทธิภาพในการกำจัดสี	70
4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชุ่มกับเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความชุ่ม เท่ากับ 22 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.2 ทดลองที่อัตราส่วนวอเตอร์ เท่ากับ 25 เปอร์เซนต์	72
4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและความเข้มข้นของเฟอร์ริคไอออน	73
4-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและความชุ่มที่เวลาในการโอโซนเนชั่นต่างๆที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความชุ่ม เท่ากับ 22 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.2 ทดลองที่อัตราส่วนวอเตอร์ เท่ากับ 25 เปอร์เซนต์	73
4-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความชุ่มที่อัตราส่วนวอเตอร์ต่างๆ ที่ซีโอดีเท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความชุ่มเริ่มต้น เท่ากับ 22 เอ็นทียู พีเอชเท่ากับ 4.2 ทดลองที่เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 60 นาที	74
4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชุ่มกับอัตราส่วนวอเตอร์ ที่ซีโอดีเริ่มต้น เท่ากับ 1,305 มิลลิกรัม/ลิตร ความชุ่มเริ่มต้น เท่ากับ 11.6 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.1 ทดลองที่เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 30 นาที	74
4-8 กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้างของแบบจำลองของประสิทธิภาพในการกำจัดความชุ่ม	78
4-9 กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้างของแบบจำลองของศักย์ซีดี	81
4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาวะสารอินทรีย์ คงที่ที่ 1,965 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาวะสารอินทรีย์ คงที่ที่ 1,490 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ	85
4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาวะสารอินทรีย์ คงที่ที่ 1,015 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ	85
4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาวะสารอินทรีย์ คงที่ที่ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ	87
4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่อัตราส่วนวีนาร์ คงที่ที่ 30 เปอร์เซนต์ ภาวะสารอินทรีย์ เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิ ภาพในการกำจัดความขุ่นต่างๆ	88
4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาวะสารอินทรีย์ เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ศักย์รีดักซ์ต่างๆ	88
4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่พีเอชคงที่ที่ 8.7 ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ	89
4-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนวีนาร์และเวลาในการโอโซนเนชั่น ภาวะ สารอินทรีย์ เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช เท่ากับ 7.3 ที่ประสิทธิภาพ ในการกำจัดความขุ่นต่างๆ	90
ก-1 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสีโฟทอสซินเทติคเปอร์แมนเกนตและ ค่าการดูดกลืนแสง	100
ก-2 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารโฟทอสซินเทติคเปอร์แมนเกนต	101
ก-3 การทดลองหาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มาตรฐาน ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งรับน้ำธรรมชาติ การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment) โดยอาศัยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ (Microorganism) ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษต่อธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม แต่น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทมีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงและเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Complex Organic) จุลินทรีย์อาจต้องใช้เวลาในการย่อยสลายที่นานขึ้น ทำให้การบำบัดทางชีววิทยาโดยตรงเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพต่ำ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือ วิธีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Chemical Oxidation) กับสารอินทรีย์ ซึ่งตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) ที่นิยมใช้ ได้แก่ คลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์มังกาเนต และการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารประกอบที่ยากต่อการย่อยสลายได้ [1] แต่การเกิดปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะเกิดสารเคมีที่อันตรายอีกทั้งคลอรีนเป็นสารที่สลายตัวในช่วงเวลาปานกลางทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ดังนั้นการใช้โอโซนซึ่งสลายตัวได้เร็วกว่าคลอรีนจึงได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Strong Oxidizing Agent) และไม่เกิดสารอันตรายตกค้างเนื่องจากโอโซนสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นออกซิเจนได้ง่าย นอกจากนั้นโอโซนยังสามารถกำจัดสี กลิ่น และรสของน้ำเสียได้เป็นอย่างดี [2]

น้ำทิ้งที่คุณภาพไม่ได้มาตรฐานจากโรงงานหมักฟิมพ์ เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าวต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการปรับปรุงระบบบำบัดขั้นต้น (Primary Treatment) เพื่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานอินเตอร์อิง จ. ฉะเชิงเทรา ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการล้างภาชนะที่ใช้ในกระบวนการ ปัญหาสำคัญของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักฟิมพ์ คือสีและความขุ่น ที่เกิดจากหมึกฐานน้ำหรือหมึกฟлексโซ (Flexo) หมึกนี้ประกอบไปด้วยเม็ดสี ชนิดอะโซ (Azo Dye) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ประกอบไปด้วยหมู่อะโซ ($N=N$) ตั้งแต่หนึ่งถึงสามหมู่ เชื่อมต่อกับ ฟีนิลเรดิคัล (Phenyl Radical) และเนฟทิลเรดิคัล (Naphthyl Radical) ซึ่งถูกแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional Groups) เช่น อะมิโน

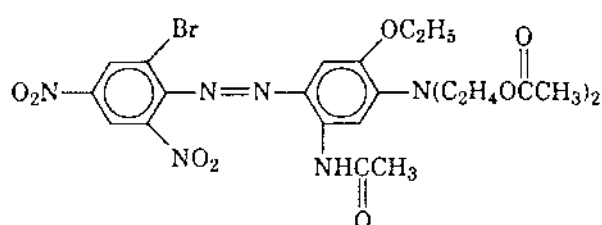
(Amino, $-\text{NH}_2$) คลอไร (Chloro, $-\text{Cl}$) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, $-\text{OH}$) เมทิล (Methyl, $-\text{CH}_3$) ไนโตร (nitro, $-\text{NO}_2$) และกรดซัลโฟนิคเกลือโซเดียม (sulfonic acid sodium salt, $-\text{SO}_3\text{Na}$) [3] ซึ่งสีเหล่านี้หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและอนุภาคของสีอาจไปขัดขวางการกระจายของแสงในน้ำ ทำให้พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศตามมา [4]

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ มักจะใช้หลายวิธีรวมกันทั้งทางด้านชีววิทยา ทางกายภาพ และทางเคมี โดยทั่วไปมักจะบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการกำจัดทางกายภาพ เพื่อกำจัดสีซึ่งเป็นส่วนที่กำจัดยากที่สุดแล้วตามด้วยกระบวนการกำจัดทางชีววิทยาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่ หรืออาจใช้เพียงวิธีการใดวิธีการหนึ่งในการบำบัดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามระบบบำบัดที่เลือกใช้จะต้องสามารถบำบัดสีและความขุ่นในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี การนำกระบวนการโอโซนเข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากโอโซนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงและเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว โดยโอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์โครโมฟอร์ (Chromophores) ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ ซึ่งดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้โดยโครโมฟอร์ของสีอะโซ ไดแก่ พันธะคู่ของไนโตรเจน ($\text{N}=\text{N}$) พันธะคู่ของคาร์บอน ($\text{C}=\text{C}$) พันธะคู่ของคาร์บอนไนโตรเจน ($\text{C}=\text{N}$) วงอะโรมาติก (Aromatic Ring) วงเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic Ring) ที่ประกอบไปด้วย ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ [3] โดยโอโซนจะไปแตกพันธะทั้งทางตรงและทางอ้อม ทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงซึ่งไม่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้เป็นสาเหตุให้สีของน้ำเสียลดลง [2]

กระบวนการโอโซนเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดสีของน้ำเสียได้สูงถึง 87-99 เปอร์เซ็นต์ [5] นอกจากนั้นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloids) ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียเป็นสาเหตุทำให้เกิดความขุ่น (Turbidity) โอโซนสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอน [6] ซึ่งตะกอนสามารถถูกกำจัดออกไปโดยการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียให้ดียิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดสีและความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเตรียมจากสีอะโซ ชนิดดิสเพิร์สบลู (Disperse Blue) ด้วยกระบวนการโอโซนขึ้นร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ โดยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการในการหาสภาวะที่เหมาะสมจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ก) การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design Of Experiment) เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยวิธีการทางสถิติในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Respond Surface Methodology) โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร

ในการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาพื้นผิวผลตอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ การออกแบบ ส่วนประสมกลาง ซึ่งเป็นที่นิยมกันมากสำหรับการสร้างแบบจำลองอันดับที่สอง (Second-Order Response Surface Model) เนื่องจากมีการเพิ่มการทดลองในแนวแกน (Axial Run) ทำให้มีจำนวนการทดลองเพียงพอที่จะใช้ในการประมาณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในแบบจำลอง ข) วิเคราะห์สัมประสิทธิ์ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และผลตอบในแบบจำลองเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลตอบให้ดีขึ้น ค) ทำนายผลตอบจาก แบบจำลองคณิตศาสตร์และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง [7]



ภาพที่ 1-1 โครงสร้างของสีย้อมโซ่ ชนิดดิสเพสบลู [8]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการโอโซนชั้น ที่สภาวะต่างๆ

1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการ โอโซนชั้นร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศที่สภาวะต่างๆ

1.2.3 วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการ โอโซนชั้น

1.2.4 วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์โดย กระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ และหาสภาวะ ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

1.2.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบการทดลองเชิงสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีของน้ำเสีย สังเคราะห์โดยกระบวนการโอโซนชั้น

1.3.2 ออกแบบการทดลองเชิงสถิติ เพื่อหาสภาวะสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความชื้นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการไอโซเนชั่นร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

1.3.3 ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยปรับค่าต่างๆ คือ ภาวะสารอินทรีย์และค่าพีเอช

1.3.4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไอโซนที่สภาวะต่างๆ และวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี

1.3.5 ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพ การกำจัดความชื้นของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไอโซเนชั่นร่วมกับการลอยตะกอน ด้วยหลักการละลายของอากาศแบบกะและวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความชื้นและการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

1.3.6 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลตอบในแบบจำลอง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงแนวทางในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานหมักพิมพ์ รวมทั้งประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการไอโซเนชั่น ร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ

1.4.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานประเภทอื่นได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ลักษณะพื้นฐานของโอโซน การผลิตโอโซน การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์ การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการการออกแบบพื้นผิวตอบ การวิเคราะห์ทางสถิติ การลอยตะกอน และเสถียรภาพของคอลลอยด์ เป็นต้น

2.1 น้ำเสียและการกำจัดน้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสารใดๆ หรือสิ่งปฏิกูลที่ไม่พึงปรารถนาอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้จะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไป จนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ น้ำมัน ไขมัน ผงซักฟอก สบู่ ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเหม็นและเชื้อโรคต่างๆ [9]

การกำจัดน้ำเสีย คือ การแยกหรือทำลายสิ่งสกปรกต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีปริมาณลดลงจนอยู่ในระดับที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียขึ้นในแหล่งรับน้ำทิ้งนั้น [9]

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Unit Operation) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Comminution) การกวาด (Skimming) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) การกำจัดตะกอนหนัก (Grit Removal) เป็นต้น

2.2.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical Unit Processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอน (Precipitation) การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

2.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Unit Processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลินทรีย์ที่จะทำการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศและจะได้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่ ระบบโปรยกรอง (Trickling Filters) ระบบตะกอนแฉะหรือระบบเอส (Activated Sludge) ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Treatment) เป็นต้น

2.2.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical Unit Processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon Adsorption) การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis) เป็นต้น [9]

2.3 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

ถ้าต้องการแบ่งออกในลักษณะเป็นขั้นตอนของการบำบัดน้ำเสีย ก็จะสามารถแยกออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

2.3.1 ระบบบำบัดก่อนขั้นต้น (Preliminary Treatment) เป็นระบบที่อยู่ในขั้นแรกๆ ของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การกำจัดตะกอนหนัก การทำให้ลอย การบดตัด เป็นต้น

2.3.2 ระบบบำบัดขั้นต้น (Primary Treatment) เป็นระบบที่อยู่ในขั้นที่ต้องการแยกสารตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย และกำจัดสารอินทรีย์บางส่วนออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรงการตกตะกอน เป็นต้น

2.3.3 ระบบบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Treatment) เป็นระบบที่กำจัดสารอินทรีย์และตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพ สำหรับระบบการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้ง เช่น การเติมคลอรีนก็จัดอยู่ในระบบบำบัดขั้นที่สองด้วย

2.3.4 ระบบบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary Treatment) เป็นระบบที่แยกและกำจัดตะกอนแขวนลอยที่หลงเหลือจากระบบบำบัดขั้นที่สอง การกำจัดสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย และการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่หลงเหลือจากระบบบำบัดขั้นที่สอง ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะทำการบำบัดน้ำเสียให้ได้คุณภาพของน้ำทิ้งดีขนาดไหนโดยทั่วไประบบบำบัดขั้นที่สามมักจะใช้กับการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่ต้องการนำกลับมาใช้อีก เช่น นำมาใช้รดน้ำสนามหญ้า ใช้กับการชักโครกของโกสั่ม ใช้กับระบบหล่อเย็น แม้กระทั่งนำไปใช้ผลิตน้ำประปา

กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเห็นได้ว่ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธีและนับวันจะมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียใหม่ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ต้องการบำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานที่กำหนดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกกระบวนการที่เหมาะสม โดยต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ทั้งทางด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ สังคมและการเมือง [9]

2.4 ลักษณะพื้นฐานของโอโซน

โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุล คือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 เป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ มีกลิ่นฉุน ที่อุณหภูมิปกติโอโซนเป็นก๊าซที่มีสี แต่ที่อุณหภูมิต่ำจะสังเกตไม่เห็นสี โอโซนบริสุทธิ์ละลายที่อุณหภูมิ -192.5 ± 0.4 องศาเซลเซียส และเดือดที่อุณหภูมิ 119 ± 0.3 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ -112 องศาเซลเซียส โอโซนบริสุทธิ์จะกลั่นเป็นของเหลวสีน้ำเงินเข้มซึ่งระเบิดได้ง่าย ที่ความเข้มข้นต่ำของผสมโอโซนกับออกซิเจน (Ozone-Oxygen Mixtures) ในส่วนผสมมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะระเบิดได้ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะก๊าซหรือของเหลว การระเบิดอาจเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยา สารอินทรีย์ ประกายไฟ หรือการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันอย่างกะทันหัน [10]

โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงตัวหนึ่ง มีศักย์ออกซิเดชันเท่ากับ 2.07 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าคลอรีน 1.52 เท่า โดยโอโซนมีความร่งไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ สารละลายและในอากาศ มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยโอโซนทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ในบรรดาตัวออกซิไดซ์ทางเคมีมีอยู่มากมาย นับว่าโมเลกุลของโอโซนมีความสามารถสูงสุดเป็นอันดับสอง รองจากโมเลกุลของฟลูโอรีน และเป็นอันดับสี่ถ้านับรวมอนุมูลไฮดรอกซิลและอะตอมเดี่ยวของออกซิเจน (ดูจากตารางที่ 2- 1) [1]

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารออกซิแดนท์ต่างๆ [1]

ตัวออกซิไดซ์	อีโอพี (โวลต์)	เทียบกับคลอรีน (เท่า)
ก๊าซฟลูโอรีน (F_2)	3.06	2.25
อนุมูลไฮดรอกซิล (OH)	2.8	2.05
อะตอมของออกซิเจน (O)	2.42	1.78
โอโซน (O_3)	2.07	1.52
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)	1.49	1.30
ก๊าซคลอรีน (Cl_2)	1.36	1.00
ก๊าซออกซิเจน (O_2)	1.23	0.90

2.5 ความเป็นพิษของโอโซนต่อมนุษย์

โอโซนเป็นก๊าซพิษ ถ้าได้มีการสัมผัสโดยตรงและในปริมาณความเข้มข้นที่สูงจะก่อให้เกิดความระคายเคืองอย่างรุนแรงโดยเป็นอันตรายต่อปอดและตา ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์อักเสบผู้ที่อยู่ในบรรยากาศของโอโซนที่เข้มข้นอาจถึงแก่ความตายได้ อย่างไรก็ตามโอโซนเข้มข้นเพียง 0.01-0.02 พีพีเอ็ม [11] ก็มักกลืนเหม็นทำให้คนรู้ตัวเสียก่อน คนสามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 พีพีเอ็ม โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงถึง 1 และ 4 พีพีเอ็ม คนจะทนได้เพียง 8 และ 1 นาทีตามลำดับ โดยไม่มีอาการผิดปกติ แต่ถ้านานกว่านี้อาจเกิดอาการผิดปกติ เช่น ไอ คอแห้ง หายใจลำบาก เคืองตา มีน้ำตาไหล ปวดหัว และแสบเยื่อจมูก ถ้าให้คนดมโอโซนเข้มข้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ (ที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่อง) จะถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที [12]

2.6 การละลายของโอโซนในน้ำ (Solubility of Ozone in Water)

การละลายของโอโซนหรือก๊าซใดๆ ในน้ำอธิบายได้ด้วยกฎของเฮนรี (Henry's Law) โดยกฎของเฮนรี กล่าวว่า ที่อุณหภูมิคงที่ ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายในของเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของก๊าซที่มีอยู่เหนือของเหลวนั้น [13] ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$y = Hx \quad (2-1)$$

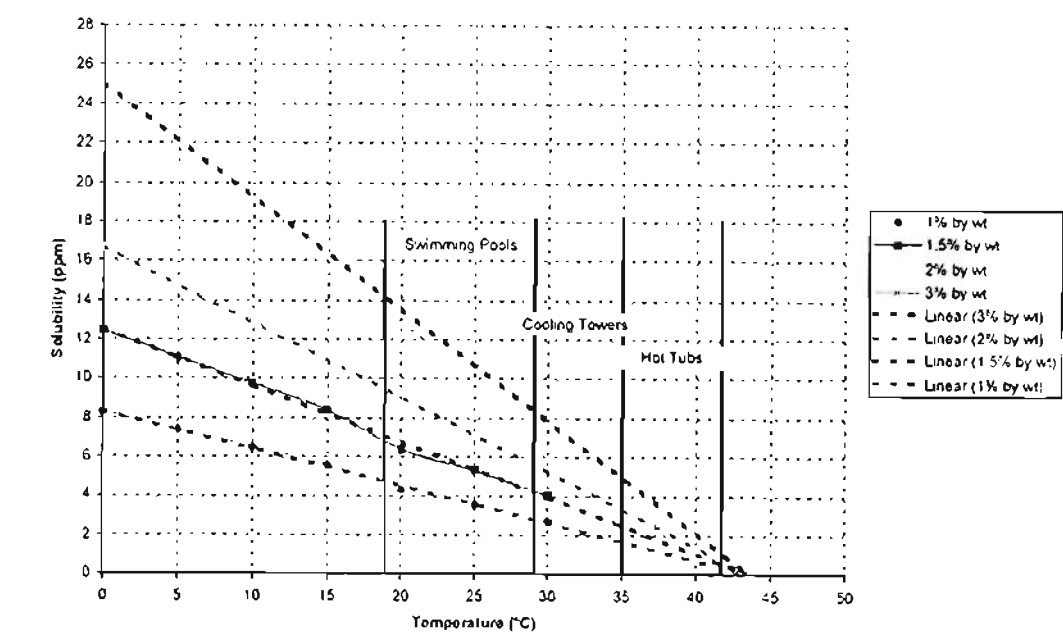
โดยที่ y คือ ความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลวที่สมดุลกับก๊าซที่ละลายในของเหลว (มิลลิกรัม/ลิตร) x คือ ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวที่สมดุลกับก๊าซเหนือของเหลว (มิลลิกรัม/ลิตร) และ H คือ ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's Law Constant) ((มิลลิกรัม/ลิตร ก๊าซ)/(มิลลิกรัม/ลิตรของเหลว))

Venosa [14] ได้เปรียบเทียบการละลายของออกซิเจนและโอโซน (ที่ผลิตที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ในอากาศ) ในน้ำที่อุณหภูมิ 0 10 20 และ 30 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2-2 ขนาดของค่าคงที่ของเฮนรีจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ไม่เกี่ยวกับความเข้มข้น โดยถ้าค่าคงที่ของเฮนรีลดลง การละลายของก๊าซก็จะมากขึ้น โอโซนสามารถละลายได้มากกว่าออกซิเจน ประมาณ 13 เท่า ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ($H = 20.4$ สำหรับออกซิเจน เทียบกับ 1.56 สำหรับโอโซน)

ตารางที่ 2-2 การละลายของโอโซนและออกซิเจนในน้ำตามกฎของเฮนรี [14]

ก๊าซ	อุณหภูมิ	H	y	x
ออกซิเจน (อากาศ)	0	20.40	299	14.6
	10	25.40	289	11.4
	20	29.90	279	9.30
	30	34.20	270	7.90
โอโซน (1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก)	0	1.56	12.90	8.30
	10	1.86	12.50	6.70
	20	2.59	12.10	4.70
	30	3.80	11.70	3.10

การละลายน้ำของโอโซนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันย่อย (Partial Pressure) ของโอโซนในสถานะก๊าซ จากภาพที่ 2-1 พบว่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ของก๊าซในน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังนั้นควรทำการบำบัดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า [1]



ภาพที่ 2-1 การละลายของโอโซนในน้ำ [15]

2.7 การเกิดโอโซน

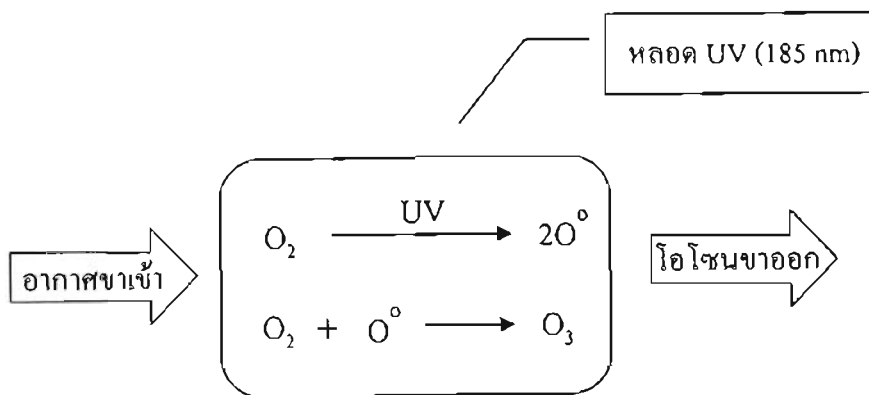
โอโซนเกิดตามธรรมชาติได้ 2 แบบ คือ

1. ปรากฏการณ์จากแสงอัลตราไวโอเลต ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 2400 อังสตรอม ทำให้ออกซิเจน (O_2) ที่ได้รับรังสีในช่วงคลื่นดังกล่าวแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O°) และไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ๆ เกิดเป็นก๊าซโอโซน (O_3) ในเวลากลางวัน ก๊าซโอโซนนี้มีความสามารถในการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตจึงทำให้เกิดความร้อนจัดในชั้นบรรยากาศระดับนี้คือ ที่ระดับสูงสุดของสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) เรียกว่า เขตอุ่น (Warm Region) [16]

2. โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดในเวลาที่ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า ขณะฝนตก ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าในอากาศที่สูงมาก ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจน และไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ๆ เกิดเป็นก๊าซโอโซน หลังฝนตกจะมีความรู้สึกที่อากาศสดชื่น [16]

กระบวนการผลิตโอโซนในอุตสาหกรรมมี 3 แบบ คือ

1. วิธีอัลตราไวโอเลต (UV Method) เป็นการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ลงบนก๊าซออกซิเจน โดยใช้หลอดยูวีขนาด 40 วัตต์ ซึ่งสามารถผลิตโอโซนได้ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก [16] แสดงดังภาพที่ 2-2

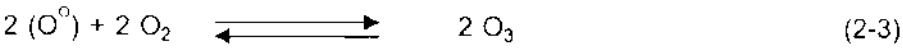
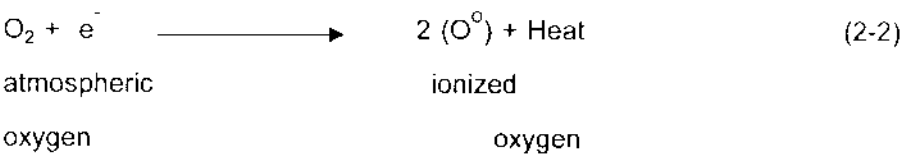


ภาพที่ 2-2 การผลิตโอโซนแบบวิธีอัลตราไวโอเลต [17]

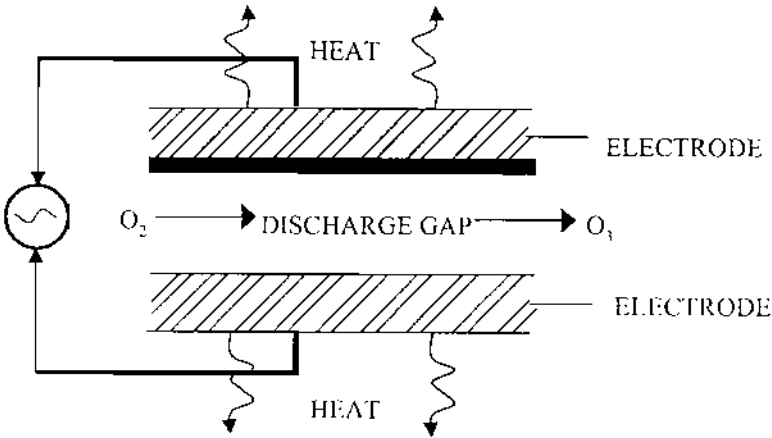
2. วิธีโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge Method)

วิธีการนี้ทำโดยผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ เข้าไปในช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000–20,000 โวลต์ ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจน บางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน โดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอน (e^-) จากนั้นอะตอมของออกซิเจน จะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน กลายเป็นโอโซน [18] ในภาพที่ 2-3 แสดงรูปแบบเครื่องผลิตโอโซนแบบวิธีโคโรนาดีสชาร์จ

สมการอธิบายปฏิกิริยาการผลิตโอโซนแบบโคโรนาดิสชาร์จ แสดงดังต่อไปนี้



โดยสมการที่ 2-2 โมเลกุลของออกซิเจน จะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน และให้พลังงานความร้อน จากนั้นอะตอมของออกซิเจน จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจน เกิดเป็นโอโซน ดังสมการที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 รูปแบบเครื่องผลิตโอโซนแบบวิธีโคโรนาดิสชาร์จ [18]

3. วิธีโคลพาสมา (Cold Plasma Method) เป็นการฉายรังสีพาสมาลงบนออกซิเจน โดยใช้แท่งแก้ว 2 แท่งที่บรรจุก๊าซเฉื่อยแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงลงบนแท่งแก้วทั้งสอง เพื่อทำให้เกิดสนามพาสมา วิธีการนี้สามารถผลิตโอโซนได้สูงถึง 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก [16] ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการผลิตโอโซนแสดงดังสมการต่อไปนี้ [18]

$$V \propto pg$$

(2-4)

$$(Y/A) \propto f \epsilon V^2/d$$

(2-5)

โดยที่ (Y/A) คือ โอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยพื้นที่ของอิเล็กโทรด

(Ozone Yield Per Unit Area Of Electrode Surface)

V คือ โวลต์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไปในช่องระหว่างอิเล็กโทรด (Applied Voltage)

P คือ ความดันก๊าซในช่องระหว่างอิเล็กโทรด

(Gas Pressure In The Discharge Gap)

g คือ ความกว้างของช่องระหว่างอิเล็กโทรด (Discharge Gap Width)

f คือ ความถี่ของโวลต์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไป (Frequency Of Applied Voltage)

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)

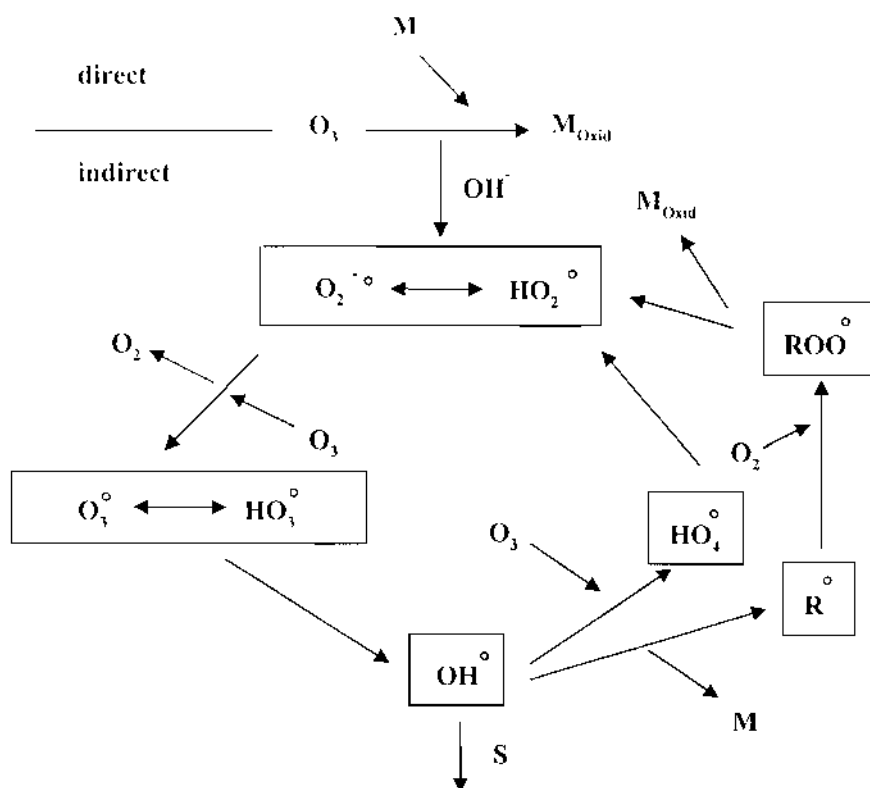
d คือ ความหนาของไดอิเล็กทริก

ความเข้มข้นของโอโซนที่ออกจากเครื่องผลิตโอโซน โดยปกติจะมีความเข้มข้นประมาณ 1-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถ้าใช้ออกซิเจนแทนอากาศจะทำให้ได้โอโซนที่ผลิตได้ในปริมาณที่มากกว่าใช้อากาศ เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในทางการค้ามักใช้หลักการโคโรนาดีสชาร์จ ดังกล่าวข้างต้น คือใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 2 อิเล็กโทรด ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันโดยชั้นของไดอิเล็กทริก (Dielectric) โดยมีช่องว่างแคบๆ ให้ออกซิเจนผ่านเข้าไป

พลังงานไฟฟ้าบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อน ดังนั้นแหล่งรับความร้อนภายนอกจึงจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะถ่ายเทความร้อนนี้ออกไป เพราะโอโซนสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [19]

2.8 การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์ [20]

โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ 2 เส้นทาง คือ ทางตรงและทางอ้อม ซึ่งในแต่ละเส้นทางของปฏิกิริยา จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน และปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยชนิดของจุลศาสตร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งต่อไปจะขอลำถึงกลไกเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อม แสดงตามภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อม

S = Scavenger , R = Reaction product , M = Micropollutant [20]

2.8.1 ปฏิกิริยาทางอ้อม (Indirect Reaction)

เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมเกี่ยวข้องกับเรดิคัล (Radical) มีความซับซ้อนมากโดยในขั้นแรกจะเกิดการสลายตัวของโอโซน ซึ่งถูกเร่งโดยตัวริเริ่ม (Initiator) เช่น ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ion, OH^-) เพื่อทำให้เกิดตัวออกซิเดนต์ลำดับที่สอง (Secondary Oxidant) เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, $\text{OH}^\bullet$) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทันที ($K = 10^8 - 10^{10} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$) กลไกของปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

2.8.1.1 ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation Step)

ปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออน และโอโซนทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนนอนเรดิคัล (Superoxide Anion Radical, $\text{O}_2^{\bullet-}$) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Hydroperoxide Radical, $\text{HO}_2^\bullet$)

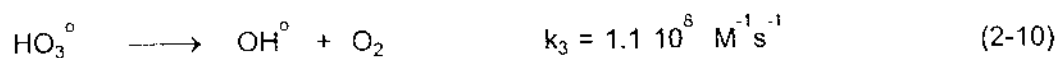
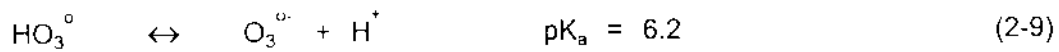


ไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล อยู่ในสมดุลกรด-เบส



2.8.1.2 ขั้นตอนลูกโซ่เรดิคัล (Radical Chain Step)

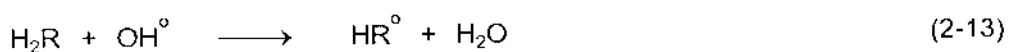
ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนนอนเรดิคัล ทำให้เกิดไฮไดรด์แอนนอนเรดิคัล (Ozonide Anion Radical, $\text{O}_3^{\circ-}$) ซึ่งจะสลายตัวทันทีเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล



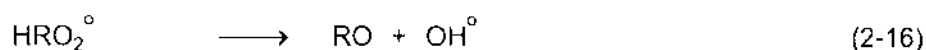
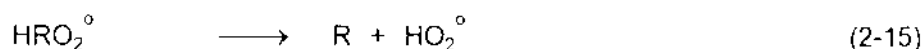
ไฮดรอกซิลเรดิคัล ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโอโซนตามสมการดังต่อไปนี้



การสลายตัวของไฮโดรเตตระออกไซด์เรดิคัล (Hydrotetraoxide Radical, HO_4°) ไปเป็นออกซิเจนและไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล จะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งสารใดก็ตามที่สามารถเปลี่ยนไฮดรอกซิลเรดิคัล ไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนนอนเรดิคัลหรือไฮโดร-เปอร์ออกไซด์เรดิคัล โดยทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ใหม่อีกครั้ง (Chain Carrier) จะถูกเรียกว่า ตัวกระตุ้น (Promoter) โมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้และบางตัวของสารอินทรีย์จะมีกลุ่มฟังก์ชันซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลและทำให้เกิดเรดิคัลของสารอินทรีย์ (R°)



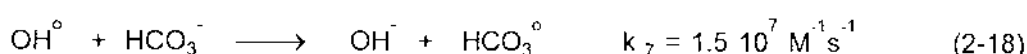
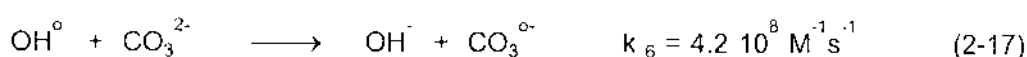
ถ้ามีออกซิเจนอยู่ในระบบสามารถเกิดออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Organic Peroxy Radical, ROO°) ได้



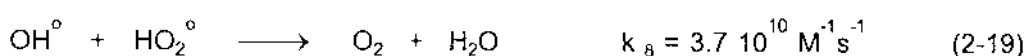
การสลายตัวของโอโซนถูกเริ่มต้นโดยไฮดรอกไซด์ไอออน นำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่และผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วแสดงถึงไฮดรอกซิลเรดิคัลมีครึ่งชีวิต (Half-Life) ที่สั้นมากๆ เช่น น้อยกว่า 10 ไมโครวินาที (μs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10^{-4} โมลาร์

2.8.1.3 ขั้นตอนสุดท้าย (Terminal Step)

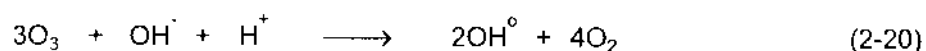
สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางตัว สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล ทำให้เกิดเรดิคัลลำดับที่สอง (Secondary Radical) ซึ่งไม่สร้างซูเปอร์ออกไซด์แอนนอนเรดิคัล หรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล จะเรียกสารเหล่านี้ว่าตัวยับยั้ง (Inhibitor/ Scavenger) ซึ่งสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่และยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้



ความเป็นไปได้อื่นที่จะหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ คือ การทำปฏิกิริยากันของเรดิคัลสองตัว



เมื่อรวมสมการทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่า 3 โมเลกุลของโอโซนจะให้ 2 โมเลกุลของไฮดรอกซิลเรดิคัล



Staehelin และ Hoigne [21] กล่าวว่า ฟอสเฟส (Phosphate) สามารถทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆ กับไฮดรอกซิลเรดิคัล แต่ที่ความเข้มข้นสูงสามารถทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นกรดฮิวมิก (Humic Acid) สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวยับยั้งและตัวกระตุ้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้น และตัวยับยั้งไฮดรอกซิลเรดิคัลที่มีประสิทธิภาพคือ บิวทิลแอลกอฮอล์ (Tert-Butyl Alcohol, TBA) ถูกใช้เป็นตัวหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ ถึงแม้ว่าในระบบ

มีกรดฮิวมิก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นอยู่ แต่การเติมบิวทิลแอลกอฮอล์ลงไปจะลดอัตราการสลายตัวของโอโซน

ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) และคาร์บอเนต (Carbonate) มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาดำแต่มีความเข้มข้นสูงในธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวยับยั้งไฮดรอกซิลเรดิคัล เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนต ($K_6 = 4.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ สำหรับ คาร์บอเนต และ $K_7 = 1.5 \times 10^7 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ สำหรับไบคาร์บอเนต) พบว่า คาร์บอเนตเป็นตัวยับยั้งที่แรงกว่าไบคาร์บอเนต Hoigne และ Bader [22] พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตกับไฮดรอกซิลเรดิคัลจะไม่ทำปฏิกิริยาต่อกับโอโซน

การเติมคาร์บอเนตลงไปในน้ำที่ผ่านการโอโซนชั้นเพียง 2-3 ไมโครโมล (μMoles) จะทำให้การสลายตัวของโอโซนลดลงเป็นผลให้ครึ่งชีวิตของโอโซนเพิ่มขึ้น ถ้าความเข้มข้นของคาร์บอเนตหรือไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 มิลลิโมลาร์ (Mm) จะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของโอโซน [22]

ตารางที่ 2-3 ชนิดของสารที่เป็นตัวริเริ่ม (Initiator) ,ตัวกระตุ้น (Promotor) และตัวยับยั้ง (Scavenger) สำหรับการสลายตัวของโอโซนในน้ำ [20]

ตัวริเริ่ม (Initiator)	ตัวกระตุ้น (Promotor)	ตัวยับยั้ง (Scavenger)
OH ⁻	Humic Acid	HCO ₃ ⁻ /CO ₃ ²⁻
H ₂ O ₂ /HO ₂ [·]	Aryl-R	PO ₃ ⁴⁻
Fe ²⁺	Primary And Secondary Alcohols	Humic Acid
		Alkyl-R
		Tert-Butyl Alcohol (TBA)

2.8.2 ปฏิกิริยาทางตรง (Direct Reaction)

สารอินทรีย์จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของโอโซนโดยตรง โดยที่โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่บริเวณพันธะคู่ (C=C, C=C-O-R, C=C-X) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ Nucleophilic C) สารอะโรเมติกที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, OH) เมทิล (Methyl, CH₃) หรือ เมทอกซี (Methoxy, OCH₃) อยู่ตรงตำแหน่งออร์โธ (Ortho) จะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (High Reactivity) แต่ถ้ามีหมู่ไนโตร (Nitro, NO₂) คาร์บอกซีลิก (Carboxylic, COOH) หรือ คาร์บอกซาลดีไฮด์ (Carboxaldehyde, CHO) ปฏิกิริยาจะเกิดช้า

2.9 การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน

2.9.1 การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรคเป็นจุดประสงค์หลักของการบำบัดน้ำในอุตสาหกรรมน้ำดื่ม ซึ่งแต่เดิมจะใช้คลอรีนเท่านั้นในการฆ่าเชื้อโรคโดยมีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสีย คือ จะมีกลิ่นคลอรีนและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ กล่าวคือปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์จะทำให้เกิดสารไตรคลอโรมีเทน (THM) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ความนิยมในการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคลดลง และได้มีการนำโอโซนมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคมากขึ้น ซึ่งโอโซนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบที่ห่อหุ้มอยู่ชั้นนอกสุดของเชื้อโรค โดยเริ่มต้นที่พันธะคาร์บอนในไขมันชนิดพอสโพลีฟอสฟอรัสของเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เซลล์รั่วหรือแตกออกแล้วตายในที่สุด ก๊าซโอโซนบางส่วนจะเข้าไปทำลายส่วนประกอบกลุ่มซัลไฮดริลเพื่อขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในแบคทีเรีย ถ้าเป็นไวรัสก็จะทำปฏิกิริยาที่แคปซิด (Protein Capsid) ซึ่งใช้ในการเกาะกับเซลล์อื่นและสลายกรดนิวคลีอิกซึ่งไวรัสใช้ในการขยายพันธุ์

แม้ว่าโอโซนจะมีราคาแพงกว่าคลอรีนแต่ เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้คลอรีนกับโอโซนพบว่า โอโซนมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีกว่าคลอรีนร้อยละ 52 และเร็วกว่า 3,000 เท่า ไม่มีปัญหาการเกิดสารไตรคลอโรมีเทน สามารถฆ่าเชื้อโรคที่คลอรีนในขนาดที่ไม่เป็นอันตรายทำไม่ได้ เช่น เชื้อไวรัส เชื้อโอดินาเซีย เชื้อคริปโตสปอริเดียม ซึ่งเป็นเชื้อปนเปื้อนในน้ำประปาที่ทำให้เกิดโรคท้องร่วงอย่างรุนแรง สามารถฆ่าเชื้อลิสต์ทีโอเซลลา ซึ่งติดมากับระบบน้ำหล่อเย็นและเป็นสาเหตุของโรคปอดบวม การนำก๊าซโอโซนมาใช้จะช่วยลดปริมาณของคลอรีนลง จึงเป็นการช่วยลดอัตราเสี่ยงจากการเกิดโรคมะเร็งได้ [2]

2.9.2 การใช้โอโซนในการกำจัดสี

โอโซนสามารถกำจัดสีได้เป็นอย่างดี ซึ่งสีของน้ำเสียโดยทั่วไปจะเกิดจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Absorb Visible Light) ซึ่งสีของน้ำเสียแต่ละแหล่งจะแตกต่างกันตามชนิดของสารปนเปื้อน สีที่เกิดจากการมีสารแขวนลอยอยู่มาก (เช่น น้ำที่มีดินที่เป็นตะกอนสีแดงทำให้น้ำขุ่นมากกว่าปกติ) เรียกว่า สีปรากฏ (Apparent Color) ซึ่งเป็นสีที่เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรือไม่ก็สะท้อนมาจากท้องฟ้า และสีที่เกิดจากการสลายตัวของพืช (เช่น สารที่สลายตัวจากกลีตินของพืช) หรือสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ เรียกว่า สีจริง (True Color)

ในการบำบัดสีน้ำเสียด้วยโอโซนจะเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ที่ก่อให้เกิดสีโดยโอโซนจะออกซิไดซ์โครโมฟอร์ (Chromophores) ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ซึ่งดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ โดยโอโซนจะไปทำลายพันธะทั้งทางตรงและทางอ้อมทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กซึ่งไม่ดูดซับแสง ที่สามารถมองเห็นได้เป็นสาเหตุให้สีของน้ำเสียลดลง [2]

2.9.3 การใช้โอโซนในการกำจัดอนุภาคหรือสร้างตะกอน

ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากอนุภาคแขวนลอย (Suspended Solid) ซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กและมีพื้นผิวที่มีประจุสูง ประจุที่พื้นผิว (Surface Charge) จะทำให้อนุภาคอยู่ในสภาพแขวนลอยเนื่องจากแรงผลักระหว่างกันที่พื้นผิว โอโซนสามารถกำจัดอนุภาคหรือสร้างตะกอนได้เป็นอย่างดี โอโซนจะไปทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ โดยโอโซนจะเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวเหล่านี้ เมื่อพื้นผิวประจุเป็นกลางอนุภาคคอลลอยด์จะรวมตัวเป็นตะกอนแล้วจะถูกกำจัดออกไปโดยการตะกอน (Sedimentation), การกรอง (Filtration) หรือ การลอยตัวอากาศ (Floatation) ในปัจจุบันได้มีการนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดขั้นต้น (Preozonation) เพื่อใช้ในการตกตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย [6]

2.9.4 การใช้โอโซนในการกำจัดกลิ่นและรส

สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ประกอบด้วยซัลเฟอร์และไนโตรเจน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นในน้ำเสีย โอโซนความเข้มข้นน้อยๆ ที่เติมในน้ำประมาณ 1-2 มิลลิกรัม/ลิตร ก็เพียงพอในการออกซิไดซ์สารประกอบเหล่านี้ นอกจากนั้นโอโซนยังสามารถป้องกันไม่ให้กลิ่นกลับมาเกิดขึ้นอีก [1]

2.9.5 การใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์

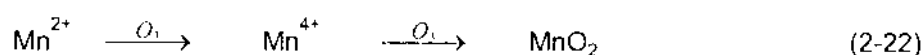
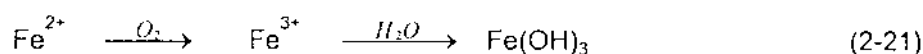
โอโซนเป็นก๊าซไม่เสถียร สามารถแตกตัวเป็นเรดิคอลต่างๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆ จึงมีการใช้โอโซนในการย่อยสลายพันธะของสารอินทรีย์ในน้ำเสียในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนนั้น อาจสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์นั้นๆ

การใช้โอโซนในการสลายพันธะของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันนอกจากจะมีการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวในการบำบัดน้ำเสียแล้วยังมีการใช้โอโซนในการบำบัดขั้นต้น (Preozonation) ก่อนที่จะทำการบำบัดทางชีววิทยา ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น

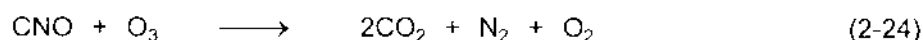
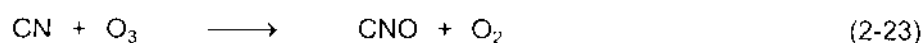
จากการศึกษากระบวนการโอโซนขั้นต้นในการบำบัดน้ำเสีย บางครั้งอาจเกิดสารมัธยันต์ (Intermediate; สารที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ที่แท้จริงของปฏิกิริยาและมักไม่เสถียร) จากการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นพิษได้ ดังนั้น ในการจะใช้ตัวออกซิแดนท์ตัวใดก็ตามเพื่อบำบัดน้ำเสียควรจะทราบถึงชนิดของสารอินทรีย์ (Dissolved Organic Matter) ที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้น คุณสมบัติทางเคมีของสารมัธยันต์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ประสิทธิภาพของออกซิแดนท์ ในการออกซิไดซ์สารว่าสามารถผ่านขั้นตอนของการเกิดสารมัธยันต์ (Intermediate Stage) ได้หรือไม่ และสามารถทำลายพิษของสารมัธยันต์ได้หรือไม่ เพื่อให้ได้ผลการบำบัดน้ำเสียที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด [23]

2.9.6 การใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์

โอโซนสามารถกำจัดโลหะโดยออกซิไดซ์โลหะในรูปสารละลาย (Soluble Form) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (Insoluble Form) ทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำโอโซนจะออกซิไดซ์เหล็กที่ละลายอยู่ในรูปเฟอร์รัส (Ferrous, Fe^{2+}) ไปเป็นเฟอริก (Ferric, Fe^{3+}) ซึ่งจะถูกไฮดรอกไซด์ไปเป็นเฟอริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide, $\text{Fe}(\text{OH})_3$) และตกตะกอนออกจากสารละลาย เช่นเดียวกับแมงกานีสไดไอออน (Manganesediion, Mn^{2+}) ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นแมงกานีสเตตระไอออน (Manganesetetraion, Mn^{4+}) ซึ่งเปลี่ยนไปเป็นแมงกานีสไดออกไซด์ (Manganesedioxide, MnO_2) ที่ไม่ละลายน้ำ ดังแสดงในสมการเคมีดังต่อไปนี้ [11]



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยาเนตจากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ได้นิโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการเคมี



การใช้โอโซนร่วมกับด่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถลดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ต้องการในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยประหยัดการใช้กรดในการปรับให้เป็นกลางลงได้ จากตารางที่ 2-4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดเป็นด่างเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนัก จากตารางจะเห็นว่าเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาว ค่าความเป็นกรดเป็นด่างจะน้อยกว่าการใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียว [1]

ตารางที่ 2-4 การเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้ไอโซนร่วมกับปูนขาวในการ
ตกตะกอนโลหะหนัก [1]

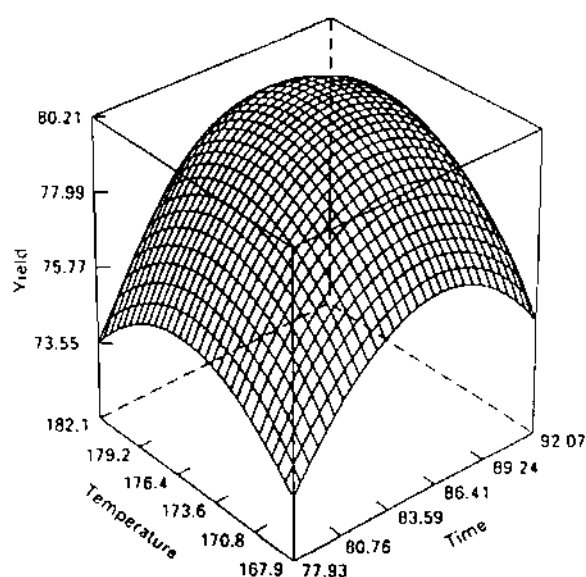
โลหะ	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง	
	ปูนขาว	ปูนขาวและไอโซน
อลูมินา	-	7
แคดเมียม	10	10
โครเมียม	9	7
โครบอล	11	9
คอปเปอร์	9	7
แมงกานีส	9	6.1
นิกเกิล	11	10
เงิน	11	10
ทองแดง	10	9
เหล็ก	4	4
ตะกั่ว	-	5.1

2.10 การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design Of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้ายิ่งปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับผลผลิตในการทดลอง (Experiment Error) วิธีการสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองคือการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้น จะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ โดยวิธีการทางสถิติในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Respond Surface Methodology) ในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลตอบและหาสภาวะที่เหมาะสม [7]

2.10.1 การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Respond Surface Methodology) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวตอบในรูปแบบของกราฟฟิก เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดียิ่งขึ้นโดยจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง [7]



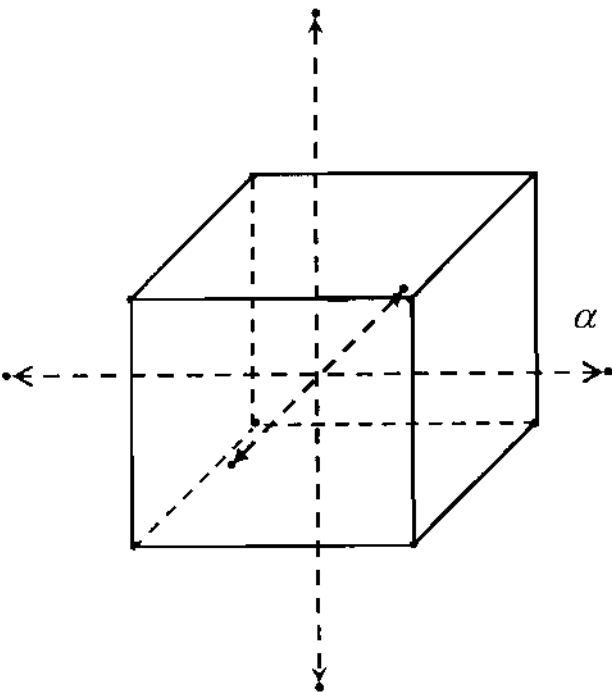
ภาพที่ 2-5 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ [7]

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพื้นผิวผลตอบมีหลายวิธี เช่น การออกแบบซิมเพล็กซ์ (Simplex Design) การออกแบบบ็อกซ์-เบห์เคน (Box-Behnken Design) การออกแบบรัศมีเท่ากัน (Equiradial Design) การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เป็นต้น โดยจะกล่าวถึงการออกแบบส่วนประสมกลางที่ใช้ในงานวิจัยเท่านั้น

การออกแบบส่วนประสมกลางนี้ใช้อย่างแพร่หลาย ในการสร้างแบบจำลองของพื้นผิวผลตอบขั้นที่สอง (Second-Order Respond Surface Model) โดยทั่วไปการออกแบบนี้จะประกอบด้วย การทดลอง ดังนี้ [7]

1. 2^k แฟกตอเรียล (Factorial 2^k) ที่มี n_f การทดลอง
2. การทดลองในแนวแกน (Axial Run)
3. n_c การทดลองที่จุดศูนย์กลาง

การออกแบบวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างแบบจำลองอันดับที่สอง เนื่องจากการเพิ่มการทดลองในแนวแกนทำให้มีจำนวนการทดลองเพียงพอ ที่จะใช้ในการประมาณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในแบบจำลอง โดยที่มีพารามิเตอร์ 2 ค่าที่ต้องถูกกำหนดในการออกแบบคือ ระยะทาง (α_0) ของการทดลองในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางในการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง (n_c) การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 3$ [7] แสดงดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 3$ [7]

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 การออกแบบส่วนประสมกลาง [7]

จำนวนตัวแปรอิสระ (k)	จำนวนการทดลอง			จำนวนการทดลองรวม	α_0
	2^k	แนวแกน	จุดศูนย์กลาง		
3	8	6	6	20	1.682
4	16	8	7	31	2.000
5	16	10	6	32	2.000
6	32	12	9	53	2.378

2.10.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ปัญหาจำนวนมากเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กัน ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปซึ่งเราสนใจที่จะสร้างแบบจำลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ โดยที่ผลตอบ (Response) ขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรอิสระ (Independent Variable) จำนวน k ตัว เช่น $x_1, x_2, \dots, x_k$ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ถูกกำหนดโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เรียกว่า แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) ซึ่งแบบจำลองนี้จะถูกสร้างขึ้นมาให้เหมาะสมกับข้อมูลตัวอย่างเซตหนึ่งในบางครั้งผู้ทดลองทราบถึงรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์ ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันระหว่าง y และ $x_1, x_2, \dots, x_k$ กล่าวคือ $y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_k)$ อย่างไรก็ตาม ในกรณีส่วนมากแล้วรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นสิ่งที่เราไม่ทราบ และดังนั้นผู้ทดลองจะต้องเลือกฟังก์ชันที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการประมาณ ϕ ซึ่งโดยมากแล้วเราจะใช้แบบจำลองพหุนามอันดับต่ำ (Low Order) ในการประมาณฟังก์ชันนี้ [24]

แบบจำลองกำลังหนึ่งที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์แสดงดังสมการ [24]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2-25)$$

หากมีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องกับในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง ซึ่งแสดงดังสมการ [24]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2-26)$$

โดย β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย
 ε คือ ค่าความผิดพลาด

การวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีในแบบจำลอง

การประมาณค่าพารามิเตอร์ (β_{ij}) ในแบบจำลองนิยมใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการหาค่าของตัวประมาณ (Estimator, b_0) ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด ในการหาค่าของตัวประมาณจะใช้การแก้สมการปกติกำลังสองน้อยที่สุดดังนี้ [25]

$$\begin{aligned}
 nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ik} &= \sum_{i=1}^n y_i \\
 b_0 + \sum_{i=1}^n x_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i
 \end{aligned} \tag{2-27}$$

$$b_0 + \sum_{i=k}^n x_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 = \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i$$

โดย y_i คือ ผลตอบที่ระดับ i
 x_{ij} คือ ตัวแปรอิสระที่ j ระดับที่ i

สมมติให้เทอมความคลาดเคลื่อน ε มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

2. การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบและเซตย่อยของตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ [24]

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_0 : \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งค่า}$$

การปฏิเสธ H_0 บอกให้ทราบว่า อย่างน้อยสุดตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง วิธีในการทดสอบจะทำได้จากการแบ่งค่าผลรวมกำลังสอง (S_{yy}) ออกเป็นผลรวมของกำลังสองเนื่องจากแบบจำลองหรือการถดถอย (SS_R) กับผลรวมของกำลังสองเนื่องจากส่วนตกค้างหรือความคลาดเคลื่อน (SS_E) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ [24]

$$SS_{yy} = SS_R + SS_E \tag{2-28}$$

$$SS_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \tag{2-29}$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{2-30}$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2-31)$$

โดย $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ได้จากการทดลอง
 $\hat{y}_i$ คือ ค่าประมาณของผลตอบที่ได้จากการทำนาย

วิธีในการทดสอบสมมติฐานคือ การคำนวณค่าสถิติ F ตามสมการ [24]

$$F_0 = \frac{\left(\frac{SS_R}{k} \right)}{\frac{SS_E}{(n-k-1)}} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (2-32)$$

โดย MS_R คือ ค่าเฉลี่ยผลรวมกำลังสองของการถดถอย
 MS_E คือ ค่าเฉลี่ยผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน
 n คือ จำนวนการทดลอง
 k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

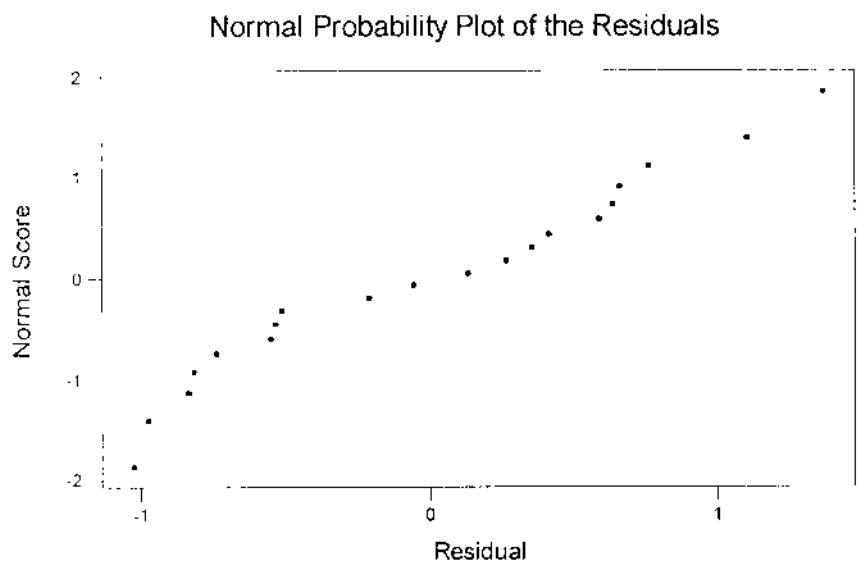
หากค่า F_0 มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, k, n-k-1}$ โดย α แทนระดับนัยสำคัญ หรือ ค่าพี (P-value) ของค่าสถิติ F_0 มีค่าน้อยกว่า α จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 [24]

3. การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (residual analysis)

ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง นิยามตามสมการ [24]

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2-33)$$

การวิเคราะห์ส่วนตกค้างสามารถพิจารณาได้ โดยนำค่าส่วนตกค้างมาเขียนเส้นกราฟแบบความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) หากรูปกราฟเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 2-7 แสดงว่า แบบจำลองมีความถูกต้องเพียงพอ หากไม่เป็นดังนั้นจะต้องทำการแปลงข้อมูลผลตอบให้เหมาะสมต่อไป [24]



ภาพที่ 2-7 ตัวอย่างกราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้างของแบบจำลองที่ดี

4. การวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่ถูกปรับค่า (Scaling Residual)

ส่วนตกค้างมาตรฐาน (Standardized Residual) นิยามตามสมการ [24]

$$d_i = \frac{e_i}{\sigma} \qquad i = 1, 2, \dots, n \tag{2-34}$$

โดยทั่วไปในการคำนวณจะใช้ $\sqrt{MS_E}$ แทน σ ในการพิจารณาส่วนตกค้างมาตรฐานจะมีเกณฑ์ของค่า d_i อยู่ระหว่าง -3 ถึง 3 หากพบว่า มีค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าวจะแสดงถึงความผิดปกติที่จุดนั้นๆ ซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในการเก็บข้อมูลหรือแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าผลตอบได้ใกล้เคียงกับผลตอบจริง

5. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2)

แม้จะได้แบบจำลองการถดถอย และผ่านการทดสอบสมมติฐานแล้วว่าผลตอบและตัวแปรมีความสัมพันธ์กัน แต่อาจมีความแตกต่างกันมากระหว่างค่าของผลตอบที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการทำนาย ทำให้เมื่อนำแบบจำลองถดถอยไปใช้จะได้ผลที่ถูกต้อง ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ จะเป็นการยืนยันว่าจะสามารถยอมรับความแตกต่างได้หรือไม่นิยามตามสมการ [7]

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_{yy}} = 1 - \frac{SS_E}{SS_{yy}} \tag{2-35}$$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มากแสดงว่าสามารถยอมรับแบบจำลองได้มากด้วยเช่นกัน แต่ไม่มีข้อระบุว่าจะยอมรับได้ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่าไร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ที่ทำการวิเคราะห์ข้อมูล อย่างไรก็ตามการที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มากไม่ได้หมายความว่าตัวแปรถดถอยทุกตัวที่อยู่ในแบบจำลองจะมีนัยสำคัญ ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่าแบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมาก อาจจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าผลตอบก็ได้ [7]

6. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า (Adjusted Coefficient Of Determination, R^2_{adj})

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า นิยามตามสมการ [7]

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(n-1)SS_E}{(n-p)S_{yy}} \quad (2-36)$$

โดย p คือ จำนวนของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า ใช้ในการพิสูจน์แบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สูงว่าเป็นแบบจำลองที่ดีหรือไม่ ซึ่งโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า จะมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเสมอ แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าแตกต่างกันมาก หมายความว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่าพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญได้ถูกเติมลงในแบบจำลอง ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงแบบจำลองโดยการตัดตัวแปรที่มีค่า F มากกว่า ระดับนัยสำคัญ ซึ่งถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่ามีค่าสูงขึ้น แสดงว่าแบบจำลองถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า มีค่าต่ำลง แสดงว่าตัวแปรนั้นควรอยู่ในแบบจำลองต่อไป [7]

7. การทดสอบแล็กออฟฟิต

การทดสอบนี้จะทำการแบ่งค่าผลรวมของกำลังสองเนื่องจากส่วนตกค้างหรือความคลาดเคลื่อน (SS_E) ออกเป็นสองส่วน ดังสมการ [24]

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (2-37)$$

โดย SS_{PE} คือ ผลรวมของกำลังสองเนื่องจากความคลาดเคลื่อนบริสุทธิ์
 SS_{LOF} คือ ผลรวมของกำลังสองเนื่องจากแล็กออฟฟิต

สำหรับค่า SS_{PI} และ SS_{LOF} สามารถคำนวณได้ตามสมการ [24]

$$SS_{PI} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2-38)$$

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2-39)$$

โดย m คือ จำนวนระดับของตัวแปรอิสระที่มีการทดลองซ้ำ

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบแลกออฟฟิตคือค่าสถิติ F แสดงดังสมการ [7]

$$F_0 = \frac{\frac{SS_{LOF}}{m-p}}{\frac{SS_{PI}}{n-m}} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PI}} \quad (2-40)$$

ถ้าค่า F_0 มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, m-p, n-m}$ โดย α แทนระดับนัยสำคัญ หรือ ค่าพี (P-value) ของค่าสถิติ F_0 มีค่าน้อยกว่า α แสดงว่า แบบจำลองควรได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น [7]

2.11 การลอยตะกอน

การลอยตะกอน (Flotation) เป็นวิธีการแยกสารแขวนลอยที่ยากต่อการตกตะกอน ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำที่ต้องการบำบัด โดยทำให้ตะกอนต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวของของเหลว เพื่อทำการกวาดทิ้งไป หลักการของการลอยตะกอนคือ การที่ผิวตะกอนดูดซับฟองก๊าซหรือเกิดการชนกันของฟองก๊าซกับตะกอน เพื่อทำให้ความถ่วงจำเพาะของมวลตะกอนแขวนลอยกับฟองอากาศมีค่าน้อยกว่าน้ำ [26]

ในทางปฏิบัติระบบลอยตะกอนนิยมใช้เพื่อแยกตะกอนที่มีน้ำหนักเบา หรือตะกอนที่มีแนวโน้มจะลอยขึ้นมา ซึ่งถ้าใช้วิธีการตกตะกอน จะไม่สามารถทำได้ดีเท่าวิธีการลอยตะกอน [26]

การนำระบบการลอยตะกอนไปใช้ในทางปฏิบัติ มีดังนี้ [26]

1. ใช้ทำหน้าที่บำบัดน้ำที่มีตะกอนเบาแขวนลอยอยู่
2. ใช้ทำหน้าที่บำบัดน้ำเสียขึ้นต้นจากโรงงานอุตสาหกรรม
3. ใช้ทำหน้าที่แยกตะกอนบางประเภท เช่น ตะกอนเบาเนื่องจากเป็นระบบที่มี

ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนเบาบางชนิดได้ดีกว่าวิธีอื่น

2.11.1 ข้อดี-ข้อเสียของระบบลอยตะกอนแบบต่างๆ [26]

โดยทั่วไประบบลอยตะกอนมีข้อดี-ข้อเสียดังนี้

ข้อดี

1. พวกไขมัน ตะกอนเบา ตะกอนหนักต่างๆ สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยใช้เพียงถังเดียว
2. ระบบนี้ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย และระบบนี้มีค่าอัตราน้ำล้นออกสูง และมีเวลาเก็บกักต่ำ ซึ่งหมายความว่า ใช้ถังที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ประหยัดค่าระบบก่อสร้าง
3. ระบบนี้ไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่นรบกวน เพราะเวลาเก็บกักของน้ำในถังลอยตะกอนมีน้อย และปริมาณออกซิเจนของน้ำในถังลอยตะกอนจะมีมากเกินไป จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวน
4. มีประสิทธิภาพในการแยกลอยตะกอนบางประเภท เช่น พวกตะกอนเบา ได้ดีกว่าวิธีอื่น
5. ตะกอนต่างๆ ที่ถูกแยกออกจากร่างานชนิด สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ไขมันนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

ข้อเสีย

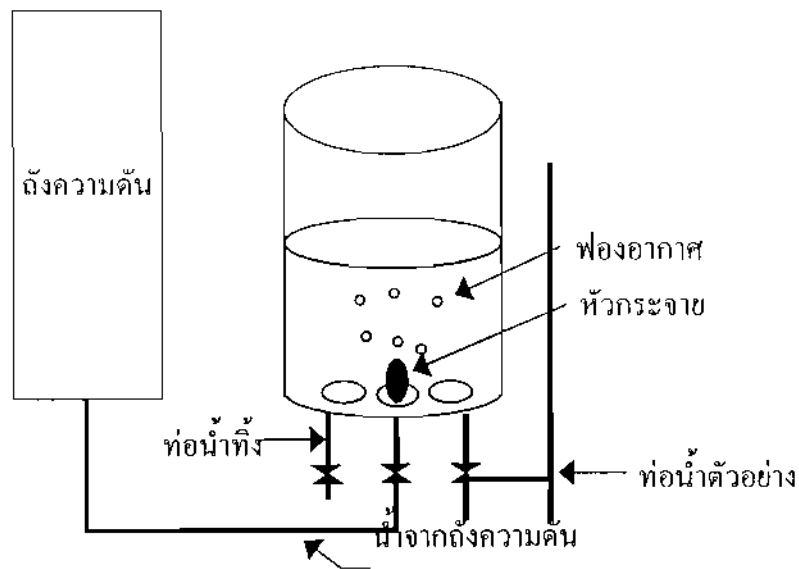
1. ต้องการเครื่องมือในการควบคุมระบบมากกว่าถังตะกอนธรรมดา ค่าไฟฟ้า ค่าสารเคมี ค่าบำรุงรักษา จะสูงกว่าการใช้ถังตะกอน
2. มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนหนักต่ำกว่าระบบถังตกตะกอน
3. ระบบลอยตะกอนแบบสูญญากาศ (Vacuum Flotation) มีราคาสูงเนื่องจากถังลอยตะกอนต้องมีขนาดใหญ่ ต้องมีความแข็งแรง และต้องคอยตรวจสอบระบบอย่างสม่ำเสมอไม่ให้มีรอยแตกร้าวในถัง ถ้ามีเพียงเล็กน้อยระบบการลอยตะกอนนี้จะไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. การควบคุมระบบจะมีความยุ่งยากมากกว่าถังตกตะกอน

2.11.2 การจำแนกระบบลอยตะกอน

การลอยตะกอนที่ใช้ในการบำบัดน้ำมีอยู่ด้วยกัน 5 ประเภท [27]

2.11.2.1 ระบบลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ (Dissolved Air Flotation)

เป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด โดยอัดอากาศเข้าไปในน้ำที่อยู่ภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เพราะต้องการให้อากาศละลายน้ำได้มากขึ้น หลังจากนั้นจึงลดความดันของน้ำลงไปที่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว อากาศส่วนเกินจากจุดอิ่มตัวจะแยกตัวออกมาเป็นฟองอากาศเล็กๆ พาสิ่งสกปรกลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ตามภาพที่ 2-8

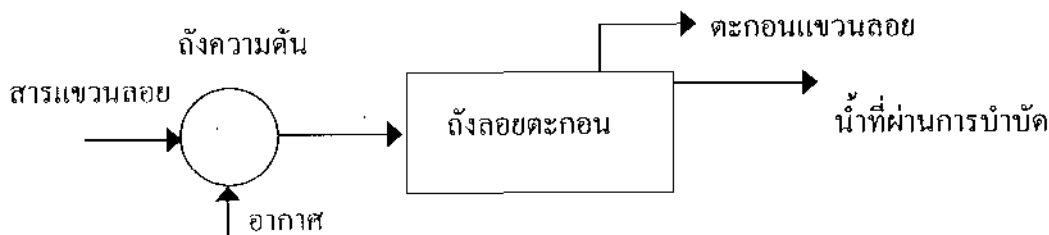


ภาพที่ 2-8 ระบบลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ [27]

กระบวนการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ แบ่งออกเป็น 4 แบบ [27]

1. ระบบอัดอากาศแบบฟูลสตรีม (Full-Stream Pressurization)

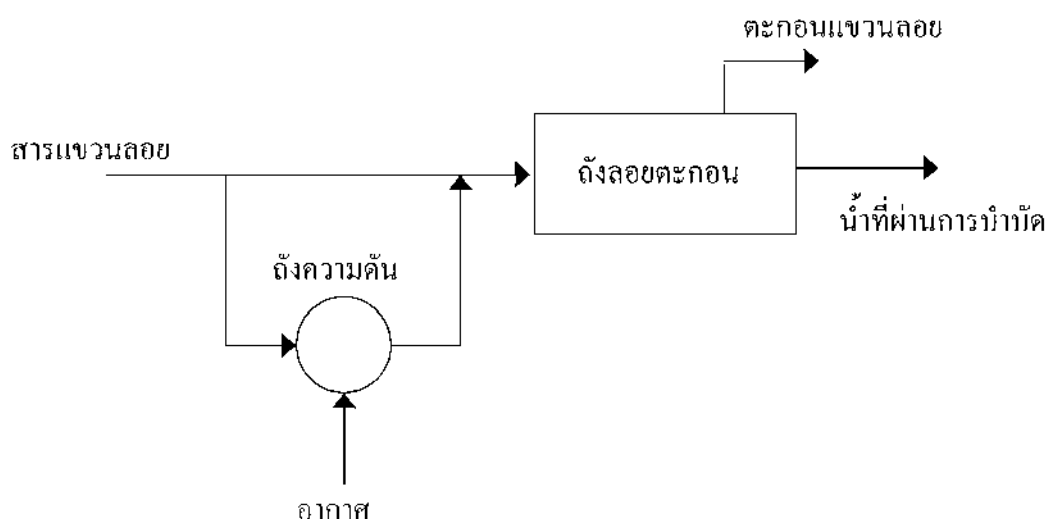
เป็นกระบวนการที่ผ่านสารแขวนลอยทั้งหมดเข้าไปอัดอากาศที่ถังความดัน และส่งต่อไปยังถังลอยตะกอน ตามภาพที่ 2-9 วิธีนี้ใช้ได้ดีเมื่อมีตะกอนแขวนลอยในน้ำสูง แต่มีข้อเสียคือ ตะกอนที่รวมตัวกันส่วนหนึ่งจะถูกทำให้แตกตัวเนื่องจากการอัดความดันในถังความดัน ทำให้ยากต่อการดักเก็บตะกอน และความสามารถในการละลายของอากาศในน้ำมีค่าต่ำกว่าการละลายในน้ำบริสุทธิ์ทำให้ฟองอากาศเกิดขึ้นน้อยกว่า



ภาพที่ 2-9 ระบบอัดอากาศแบบฟูลสตรีม [27]

2. ระบบอัดอากาศแบบสปริทสตรีม (Split Stream Pressurization)

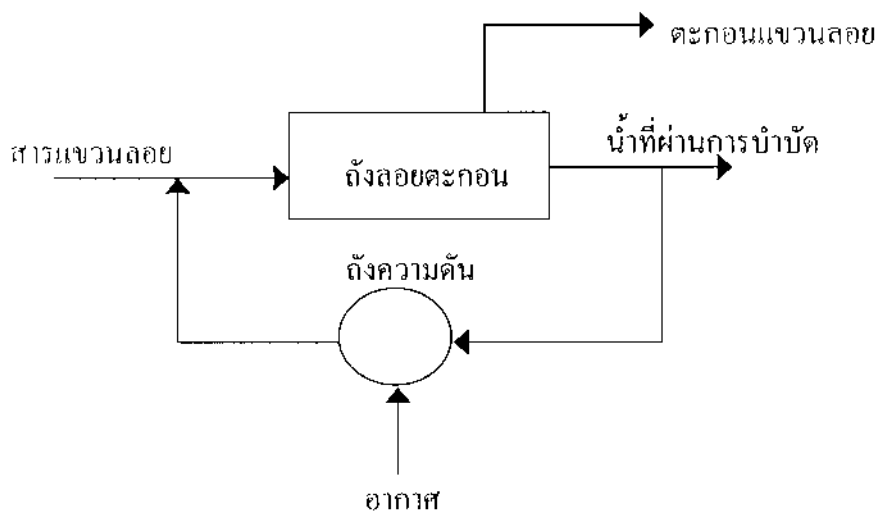
ระบบนี้เป็นการทำงานโดยการแยกสารแขวนลอยออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะนำมาอัดอากาศแล้วจึงไปรวมกับสารแขวนลอยอีกส่วนก่อนที่จะส่งต่อไปยังถังลอยตะกอน ตามภาพที่ 2-10 ระบบนี้เหมาะสำหรับน้ำที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในปริมาณต่ำ ข้อเสียของระบบนี้มีเช่นเดียวกับระบบอัดอากาศแบบฟูลสตรีม



ภาพที่ 2-10 ระบบอัดอากาศแบบสปริทสตรีม [27]

3. ระบบอัดอากาศแบบรีไซเคิลสตรีม (Recycle-Stream Pressurization)

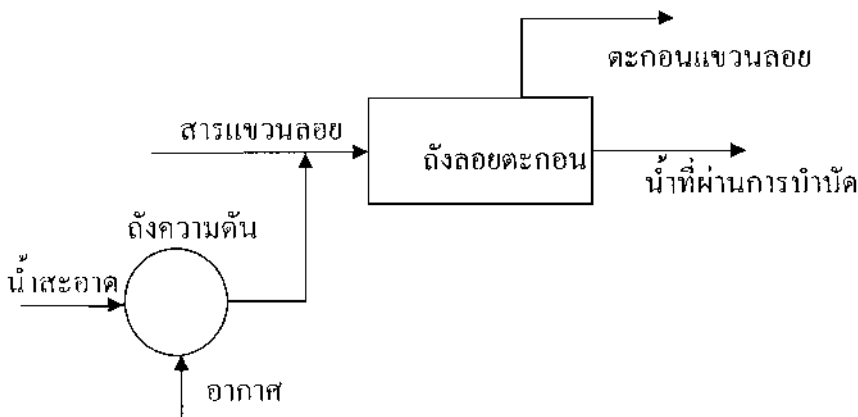
ระบบนี้เป็นการทำงานโดยนำเอาน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Effluent) มาอัดอากาศก่อนที่จะนำไปรวมกับสารแขวนลอยแล้วปล่อยเข้าสู่ถังลอยตะกอน ตามภาพที่ 2-11 ระบบนี้เป็นระบบที่ใช้งานมากที่สุดเนื่องจากทั้ง 2 ระบบข้างต้นทำให้ตะกอนเกิดการแตกตัวขณะเพิ่มความดัน อีกทั้งระบบนี้อากาศสามารถละลายในน้ำได้ดีกว่า 2 ระบบแรก แต่ระบบนี้จะมีขนาดของอุปกรณ์ที่ใหญ่กว่า 2 ระบบแรก



ภาพที่ 2-11 ระบบอัดอากาศแบบไบโตรีคเคิลสตรีม [27]

4. ระบบอัดอากาศแบบคลีนวอเตอร์ (Clean-Water Pressurization)

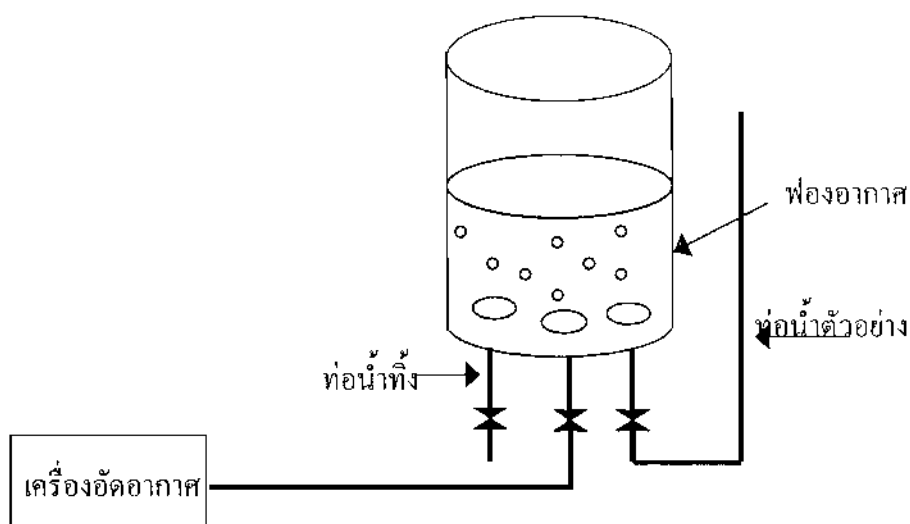
เป็นกระบวนการที่มีระบบการทำงานคล้ายกับระบบ Recycle-Stream Pressurization แตกต่างกันที่น้ำที่เข้าถังความดันเป็นน้ำสะอาด แทนที่จะเป็นน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ตามภาพที่ 2-12 ระบบนี้อากาศสามารถละลายในน้ำได้มากกว่า 3 ระบบแรก ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีปริมาณมากกว่า แต่จะมีข้อเสียคือ ต้องใช้น้ำสะอาดป้อนเข้าสู่ถังความดันตลอด ทำให้สิ้นเปลืองน้ำสะอาด



ภาพที่ 2-12 ระบบอัดอากาศแบบคลีนวอเตอร์ [27]

2.11.2.2 ระบบลอยตะกอนแบบดิสเพิร์สแอร์ (Dispersed Air Flotation)

ระบบนี้เป็นการทำงานโดยการเป่าอากาศเข้าไป ในสารละลายผ่านหัวจ่ายให้อากาศกระจายตัว ฟองอากาศจะพาตะกอนแขวนลอยและสิ่งสกปรกขึ้นสู่ผิวน้ำ ตามภาพที่ 2-13 วิธีนี้จะได้ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าระบบลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ



ภาพที่ 2-13 ระบบลอยตะกอนแบบดิสเพิร์สแอร์ [27]

2.11.2.3 ระบบการลอยตะกอนแบบฟร็อท (Froth Flotation)

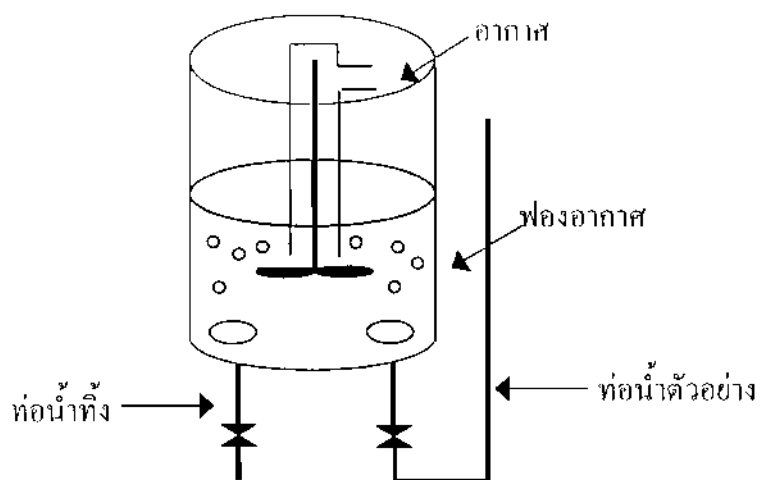
ระบบเป็นการทำงานโดยการเติมอากาศผ่านใบกวนความเร็วรอบสูง ฟองอากาศจะถูกตีให้แตกกระจายเป็นฟองขนาดเล็ก พาคะกอนแขวนลอยและสิ่งสกปรกลอยขึ้นสู่ด้านบนตามภาพที่ 2-14 วิธีนี้นิยมไปใช้ในการแยกสินแร่

2.11.2.4 ระบบลอยตะกอนแบบอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic Flotation)

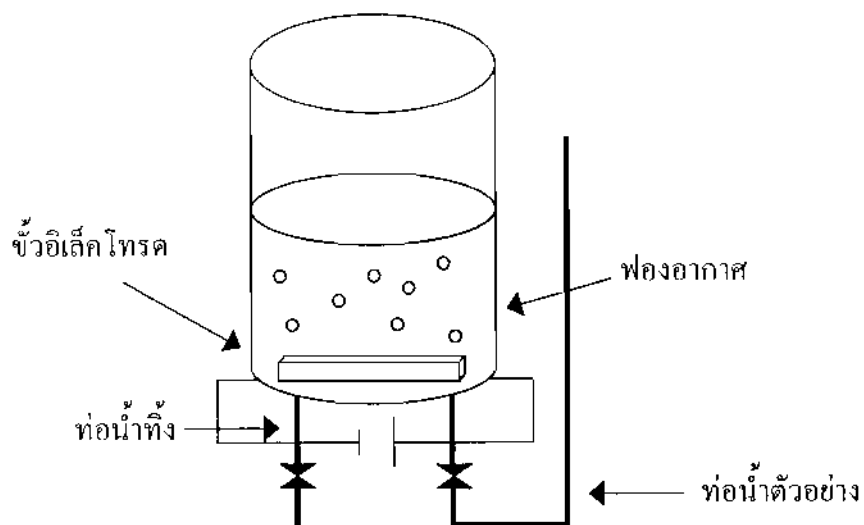
ระบบนี้เป็นการทำงานโดยการผลิตฟองอากาศ เพื่อใช้ในการแยกตะกอนแขวนลอย โดยใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งที่ขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กพาคะกอนแขวนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ตามภาพที่ 2-15

2.11.2.5 ระบบลอยตะกอนแบบสุญญากาศ (Vacuum Flotation)

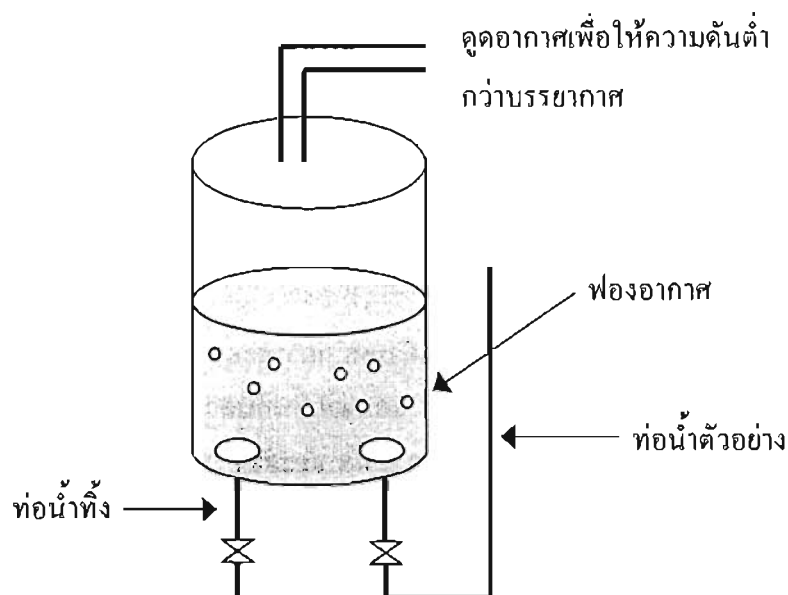
ระบบนี้จะตรงกันข้ามกับระบบลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ คือพยายามเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรงหรืออีกวิธีคือ ปลอຍให้อากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเอง ระบบนี้จะใช้ถังปิดซึ่งจะเก็บน้ำที่เป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว ขณะนี้ภายในถังจะมีสภาพเป็นสุญญากาศ เมื่อถังนี้ได้ถูกเปิดออกโดยใช้ตัวควบคุมวาล์ว อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาจากน้ำในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ โดยที่ฟองอากาศเล็กๆ เหล่านี้จะพาคะกอนต่างๆ ในน้ำเสีย ลอยขึ้นมาบนผิวน้ำซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำโดยการกวาดหรือสูบน้ำออก ตามภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-14 ระบบลอยตะกอนแบบพรอท [27]



ภาพที่ 2-15 ระบบลอยตะกอนแบบอิเล็กโทรไลติก [27]



ภาพที่ 2-16 ระบบลอยตะกอนแบบสุญญากาศ [27]

2.11.3 กระบวนการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ [28]

ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การละลายของอากาศในน้ำ เพื่อเพิ่มปริมาณอากาศที่ใช้ในการลอยตะกอน
2. การลดความดัน เพื่อก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก
3. การชนของฟองอากาศขนาดเล็กกับอนุภาคเพื่อให้อนุภาคมีความหนาแน่นลดลง และลอยขึ้น
4. การดักเก็บตะกอนหรืออนุภาคที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

2.11.3.1 การละลายของอากาศในน้ำ

ปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำขึ้นกับความดันของระบบ โดยเป็นไปตามกฎของเฮนรี ซึ่งมวลก๊าซที่ละลายในน้ำจะแปรผันตามความดันย่อย และปริมาณก๊าซตามทฤษฎีที่ถูกปล่อยออกมาจากสารละลายเมื่อลดความดันลงมาที่ความดันบรรยากาศ คำนวณจากสมการ

$$S_p = S_g \left(\frac{P}{14.7} - 1 \right) \quad (2-41)$$

เนื่องจากอากาศละลายในน้ำทั่วไปได้น้อยกว่าการละลายในน้ำบริสุทธิ์ ดังนั้นต้องปรับสมการเป็น

$$S_p = S_g \left(\gamma \frac{P}{14.7} - 1 \right) \quad (2-42)$$

- โดยที่ S_p คือ ปริมาณก๊าซที่ปล่อยออกมาที่ความดันบรรยากาศ, (มิลลิกรัม/ลิตร)
 S_g คือ ปริมาณก๊าซอิมิตวที่ความดันบรรยากาศ, (มิลลิกรัม/ลิตร) หาค่าได้จาก
 เอกสารอ้างอิง
 P คือ ความดันสมบูรณ์, (Psia)
 γ คือ ประสิทธิภาพของการละลาย, ไร้นหน่วย

ความดันเกจที่ใช้ในระบบลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ ปกติมีค่าอยู่ในช่วง 3-6 บาร์เกจ การละลายของอากาศในน้ำ นอกจากขึ้นกับความดันและคุณลักษณะของน้ำแล้วยังขึ้นกับรูปแบบของการเติมอากาศคือ เวลาสัมผัส และสัมประสิทธิ์การพามวล ซึ่งเมื่อพิจารณาการเติมอากาศในน้ำแล้ว จะมีหลายวิธีดังนี้

1. ระบบสปาร์คแอร์ (Sparged Air System) อากาศจากเครื่องสูบลูกอากาศถูกอัดผ่านหัวกระจายเข้าไปในน้ำที่ความดันระบบ พบว่าประสิทธิภาพของการทำให้อากาศอิมิตวขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาในการสัมผัส

2. ระบบแอร์อินเจคชั่น (Air Injection System) อากาศถูกอัดโดยปั๊มเข้าไปผสมกับน้ำภายในปั๊ม พบว่าจะเกิดการลีดตัวของอากาศภายในปั๊ม ทำให้อัตราการไหลของน้ำลดลง และปั๊มที่ใช้ต้องเป็นปั๊มชนิดพิเศษที่สามารถทนการเกิดคาวิเตชัน (Cavitation) ได้ดี

3. ระบบแพคคอลัมน์ (Packed Column System) เหมือนกับระบบสปาร์คแอร์ แต่ถังความดันมีการบรรจุเพคกิง (Packing) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส

การละลายของอากาศในน้ำของระบบแพคคอลัมน์ ให้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณร้อยละ 90 ที่ความดันภายในสูงกว่า 3 บาร์เกจ ขณะที่ระบบแอร์อินเจคชั่นให้ประสิทธิภาพการละลายสูงสุดเพียงร้อยละ 25 ของค่าตามทฤษฎี เนื่องมาจากการเกิดการลีดตัวของอากาศภายในปั๊ม และระบบสปาร์คแอร์ให้ประสิทธิภาพการละลายสูงสุดเพียงร้อยละ 60-70 ของค่าตามทฤษฎี

2.11.3.2 การเกิดฟอง (Bubble Formation)

ฟองอากาศในน้ำที่เกิดจากสารละลายอิมิตวยิ่งยวด (Supersaturated) มีสาเหตุ 2 ประการ ประการแรกเกิดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดฟองอากาศในของเหลว ขณะที่ลดความดันระบบลง ซึ่งสามารถเกิดได้กับระบบเนื้อเดียว (Homogeneous) ประการที่สองเป็นผลจากการรวมตัวของฟองอากาศขนาดเล็กมากที่เกาะอยู่ตามผิวของอนุภาคของแข็ง ซึ่งการศึกษาการเกิดฟองประกอบด้วยพารามิเตอร์ ดังนี้

1. กลไกของการเกิดฟองอากาศ ฟองอากาศขนาดเล็กในกระบวนการลอยตะกอน มีสาเหตุจากการเกิดคาวิเตชันของน้ำอิมิตวที่ความดันสูง เมื่อน้ำไหลผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้ความดันของน้ำลดลง อุปกรณ์ที่ว้านในทางปฏิบัติ ได้แก่ วาล์วรูเข็ม (Needle Valve) แผ่นออริฟิส เป็นต้น จากการศึกษาภาพถ่ายพบว่าฟองอากาศขนาดเล็ก เกิดขึ้นที่บริเวณอุปกรณ์ลดความดัน ไม่ใช่เกิดในถังตกตะกอน

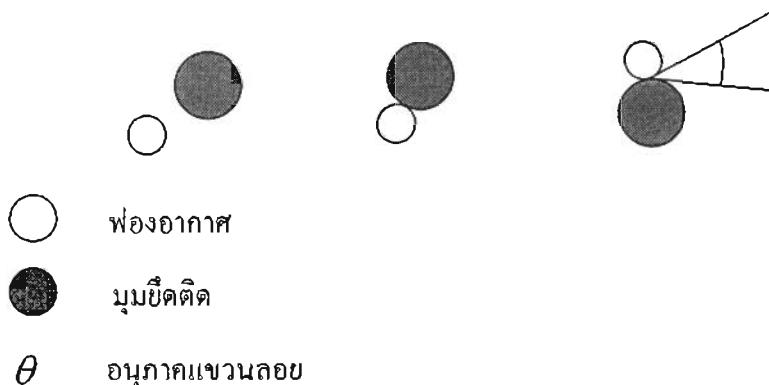
2. ขนาดของฟองอากาศ พบว่าขึ้นกับลักษณะของอุปกรณ์ลดความดัน และคุณลักษณะการไหลของของเหลวขณะที่ลดความดัน ถ้าลักษณะการไหลทำให้เกิดการไหลปั่นป่วน ทำให้เวลาในการกระจายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น โอกาสที่เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีค่าเพิ่มขึ้น

3. อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อการเกิดฟองอากาศ พบว่า คุณสมบัติเฉพาะตัวของสารละลายจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล เป็นผลโดยตรงต่อการละลายของอากาศในสารละลายในน้ำทั่วไป จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ ปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำทั่วไปจึงมีค่าต่ำกว่าทำให้ปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นน้อยกว่า แรงตึงผิวเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดฟอง พบว่าสารละลายที่มีค่าแรงตึงผิวสูงจะเกิดฟองอากาศขนาดใหญ่และสารละลายที่มีแรงตึงผิวดำ จะเกิดฟองอากาศขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้ยังมีผลของความดันที่อัดเข้าไปในสารละลาย พบว่าเมื่อเพิ่มความดันมากขึ้นฟองอากาศมีขนาดเล็กลงและมีแนวโน้มคงที่ เมื่อเพิ่มความดันไปถึงระดับหนึ่ง และผลของอุณหภูมิ พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำ การละลายของอากาศในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นปริมาณฟองอากาศที่ปลดปล่อยมีค่าสูงขึ้น

2.11.3.3 การสัมผัสของฟองอากาศและตะกอนในระบบลอยตะกอน

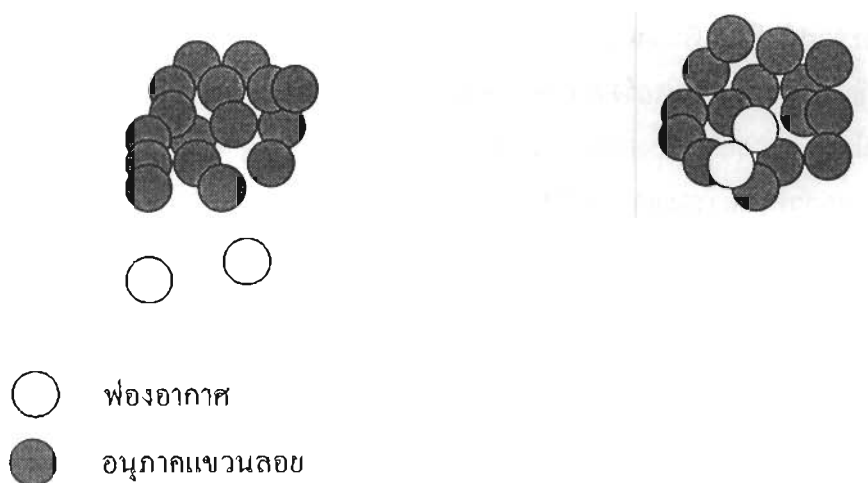
ขั้นตอนนี้มีผู้ศึกษาน้อยมาก Vrablik [29] ได้เสนอกลไกการชนระหว่างฟองอากาศกับตะกอนในระบบลอยตะกอนไว้ 3 กลไก คือ

1. การยึดติด (Adhesion) ของฟองอากาศบนตะกอนแขวนลอย



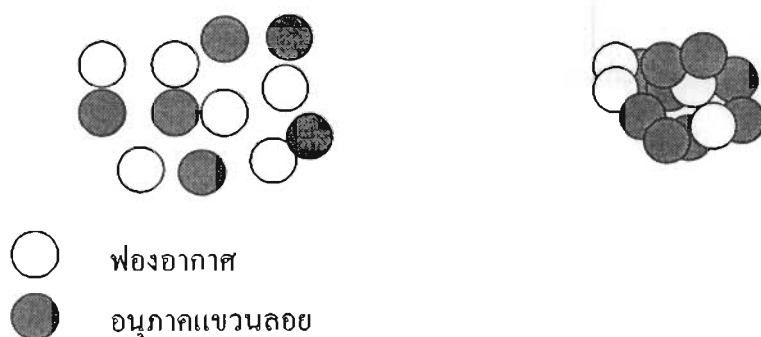
ภาพที่ 2-17 การยึดติดของฟองอากาศบนตะกอนแขวนลอย [29]

2. การยึดจับทางกายภาพ (Physical Entrapment) ของฟองอากาศในโครงสร้างของตะกอนแขวนลอย



ภาพที่ 2-18 การจัดเรียงตัวทางกายภาพของฟองอากาศ [29]

3. การดูดซับ (Incorporation) ของฟองก๊าซขณะที่เกิดตะกอน



ภาพที่ 2-19 การดูดซับของฟองก๊าซขณะที่เกิดตะกอน [29]

การเกิดการยึดติดอาจเป็นผลมาจากการชนกัน ระหว่างฟองอากาศและตะกอนแข็งแขวนลอย อย่างไรก็ตามยังไม่มีบทลงโทษที่กล่าวถึงกลไกที่เกิดขึ้นของการสัมผัสของฟองอากาศในระบบลอยตะกอนอย่างชัดเจน ในระบบลอยตะกอน ที่มีน้ำป้อนเวียนกลับจะเกิดกลไกการชนและยึดติดมาก ซึ่งอากาศมีโอกาสมากที่จะเกิดนิวเคลียส (Nucleating) ระหว่างที่ลดความดัน

การยึดติดของฟองอากาศบนตะกอน เป็นผลจากการชนของฟองอากาศที่กระจายในของเหลวกับตะกอนเกิดเป็นตะกอนที่เสถียร ดังนั้นมุมของการชนกันระหว่างฟองอากาศกับพื้นผิวของตะกอนเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งในการศึกษาสามารถกระทำได้โดยการเปลี่ยนค่าไฮโดรโฟบิกซิตี (Hydrophobicity) ของพื้นผิวตะกอน

กลไก 2 และ 3 นี้ไม่ได้ขึ้นกับคุณสมบัติที่ผิวของตะกอนของแข็ง แต่ขึ้นกับคุณลักษณะกายภาพทางโครงสร้างของตะกอนที่มีกลไกการเกิดขึ้นเป็นแบบนอนซีเล็คทีฟ (Nonselective) และทุกโครงสร้างของตะกอนสามารถดักจับ (Trapping) ฟองอากาศได้ เนื่องจากพื้นที่ผิวขรุขระของตะกอนของแข็งและการเติมสารฟลูออโรไฮโดรไลต์ และเกลือของโลหะช่วยทำให้ตะกอนเกิดการรวมตัวได้ดี

2.11.3.4 การดักเก็บตะกอนหรืออนุภาคที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

การดักเก็บตะกอนสามารถกักเก็บได้จากการติดตั้งใบกวาด (Skimmer) ทางด้านบนของถังลอยตะกอนหรือการกักเก็บโดยการติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ภายในถังลอยตะกอน

2.11.4 การประยุกต์ใช้ระบบลอยตะกอนในอุตสาหกรรม [27]

นิยมใช้มากในการแยกของแข็ง/ของเหลว ได้จำแนกการประยุกต์ใช้เป็น 4 หัวข้อ คือ การเก็บเกี่ยวผลผลิต (Product Recovery) การทำน้ำสะอาด (Water Clarification) การเพิ่มความเข้มข้นของตะกอน (Sludge Thickening) และการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Energy Recovery) โดยอุตสาหกรรมที่ใช้ระบบลอยตะกอน มีดังนี้

1. อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้ในการนำเยื่อกระดาษกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณน้ำเสีย อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการนำไขมันกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิง
2. อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ใช้ในการนำน้ำมันและน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเคมีกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิง
3. อุตสาหกรรมสินแร่ ใช้ในการแยกสินแร่ที่มีค่า
4. การบำบัดน้ำเสีย มีการนำระบบลอยตะกอนไปใช้งานมากที่สุด ใช้ในการแยกตะกอนของแข็งออกจากน้ำ
5. การเพิ่มความเข้มข้นของตะกอน ในกรณีที่ตะกอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า
6. ในการผลิตน้ำประปา แยกตะกอนสิ่งสกปรกออกด้วยระบบลอยตะกอน แทนที่จะใช้ถังตกตะกอน

2.12 เสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกพิจารณา โดยแรงที่กระทำระหว่างอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง โดยที่แรงเหล่านี้คือ แรงทางไฟฟ้า (Electrostatic) ที่เกิดจากชั้นของประจุ (Electrical Double Layer) ที่ล้อมรอบอนุภาค ซึ่งถ้าเป็นอนุภาคมีประจุเหมือนกันแขวนลอยอยู่ จะมีแรงผลักระหว่างประจุที่ล้อมรอบอนุภาคนั้น ทำให้ไม่สามารถรวมกันได้จึงเกิดความขุ่นขึ้นในน้ำ แต่ถ้าอนุภาคมีประจุต่างกันจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค นอกจากนั้นแรงระหว่างอนุภาคยังประกอบไปด้วยแรงดึงดูดชนิดแรงวานเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วคู่ชนิดชั่วคราว (Temporary Dipoles) ที่อยู่บนพื้นผิว [30]

2.12.1 ทฤษฎี DLVO

ในปี ค.ศ. 1940 Derjaguin Landau Verway และ Overbeek ได้เสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยกล่าวว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกพิจารณาโดยการรวมกันของแรง 2 แรง คือ แรงผลักระหว่างอนุภาคที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้าและแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่เกิดจากแรงวานเดอร์วาลส์ ตามสมการ [31]

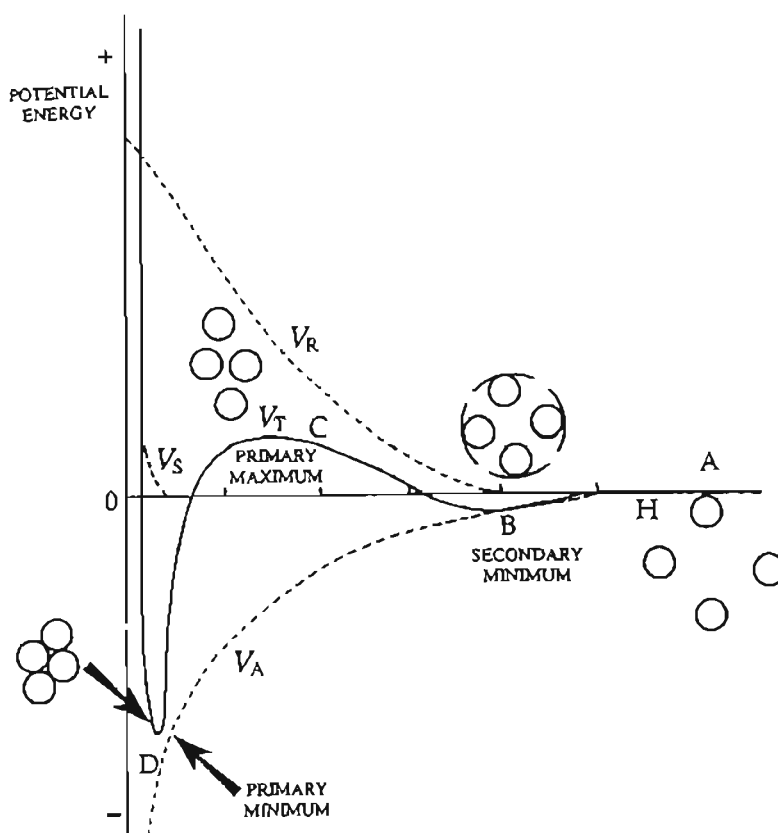
$$V_T = V_A + V_R \quad (2-43)$$

โดยที่ V_T คือ พลังงานศักย์รวมทั้งหมด (total potential energy)
 V_A คือ พลังงานที่เกิดจากแรงดึงดูดชนิดแรงวานเดอร์วาลส์
 V_R คือ พลังงานที่เกิดจากแรงผลัทางไฟฟ้า

เมื่อ V_T เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอนุภาค (H) ภาพที่ 2-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์และระยะทางระหว่างอนุภาค [30]

จากภาพที่ 2-20 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออนุภาคห่างกันเป็นระยะทางมากๆ (ช่วงเอ) เช่น มากกว่า 100 นาโนเมตร พลังงานที่เกิดจากแรงดึงดูดชนิดวานเดอร์วาลส์ (V_A) และพลังงานที่เกิดจากแรงผลัทางไฟฟ้า (V_R) จะไม่มีผลต่ออนุภาค เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมากขึ้น (ช่วงบี) เช่น มากกว่า 60 นาโนเมตร แรงดึงดูดชนิดวานเดอร์วาลส์ และ แรงผลัทางไฟฟ้า จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่แรงผลัทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นช้ากว่าแรงดึงดูดชนิดวานเดอร์วาลส์ ทำให้อนุภาคในช่วงนี้มีแนวโน้มมารวมตัวกัน แต่เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมากขึ้นโดยมีระยะห่างประมาณ 20 นาโนเมตร (ช่วงซี) ซึ่งในช่วงนี้แรงผลัทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดึงดูดชนิดวานเดอร์วาลส์ ทำให้เกิดพลังงานขัดขวาง (Energy Barrier) การรวมตัวกันของอนุภาค ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นจนถึงช่วงดี ซึ่งเป็นช่วงที่แรงดึงดูดชนิดวานเดอร์วาลส์มีค่ามากกว่าแรงผลัทางไฟฟ้ามาก ทำให้อนุภาครวมตัวกันแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible Coagulate) [30]

พฤติกรรมในการรวมตัวกันของอนุภาคถูกกำหนดโดยพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ถ้าพลังงานจลน์ของอนุภาคมีค่ามากกว่าพลังงานขัดขวางการรวมตัวกันของอนุภาค จะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันที่ตำแหน่งต่ำที่สุดของช่วงดี (Primary Minimum) แต่ถ้าอนุภาคไม่มีพลังงานจลน์มากพอที่จะเอาชนะพลังงานขัดขวางการรวมกันของอนุภาค จะทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวหรือเกิดการรวมตัวกันอย่างอ่อนที่ตำแหน่งต่ำที่สุดของช่วงซี (Secondary Minimum) ซึ่งการรวมตัวกันของอนุภาคที่ตำแหน่งนี้จะทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ง่ายโดยการเติมสารละลาย อิเล็กโทรไลต์หรือโดยการกวนเพื่อให้อนุภาคที่รวมตัวกันอยู่เกิดการกระจายตัว [30]

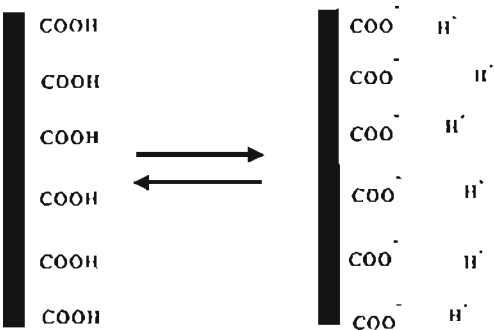


ภาพที่ 2-20 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์และระยะทางระหว่างอนุภาค [30]

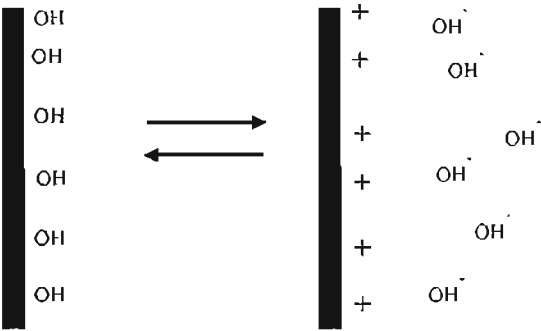
2.12.2 การเกิดประจุบนผิวอนุภาค [32]

การเกิดประจุบนผิวอนุภาคเกิดได้หลายวิธี โดยขึ้นอยู่กับ

2.12.2.1 ความสามารถในการแตกตัวของอนุภาคนั้นๆ เช่น การแตกตัวของหมู่กรดจะทำให้เกิดประจุลบบนผิวอนุภาค ตามภาพที่ 2-21 การแตกตัวของหมู่เบสจะทำให้เกิดประจุบวกบนผิวของอนุภาค ตามภาพที่ 2-22 โดยที่ขนาดของประจุที่อยู่บนอนุภาคขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของหมู่กรดหรือหมู่เบสที่เกาะบนผิวของอนุภาค



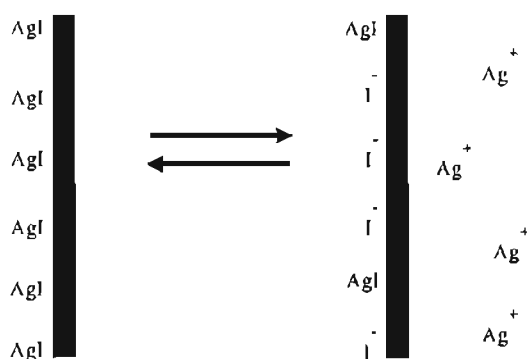
ภาพที่ 2-21 ประจุบนผิวที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่กรด [32]



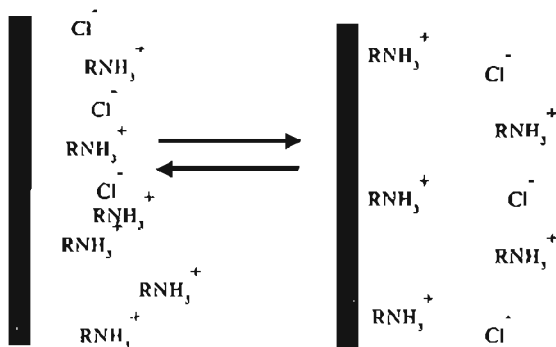
ภาพที่ 2-22 ประจุบนผิวที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่เบส [32]

2.12.2.2 การแตกตัวของไอออนของสาร ตามภาพที่ 2-23 เป็นการแตกตัวของคลิสตัลของซิลเวอร์ไอโอไดด์ (AgI) โดยที่ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) แตกตัวออกไปมากกว่าไอโอไดด์ไอออน (I^-) ทำให้ประจุบนผิวของอนุภาคเป็นลบ

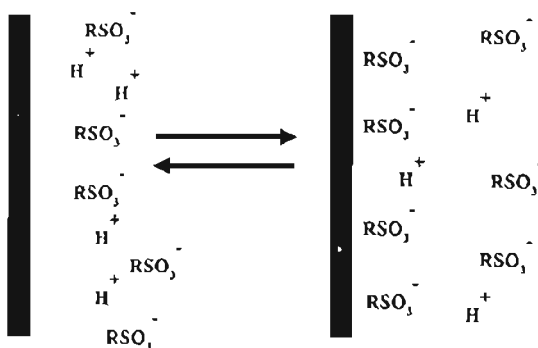
2.12.2.3 การดูดซับไอออนของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant Adsorption) ที่ผิวของอนุภาค เช่น การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic Surfactant) จะทำให้เกิดประจุบวกบนผิวของอนุภาค ตามภาพที่ 2-24 การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic Surfactant) จะทำให้เกิดประจุลบบนผิวของอนุภาค ตามภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-23 ประจุบนผิวที่เกิดจากการแตกตัวของไอออนสาร [32]



ภาพที่ 2-24 ประจุบนผิวที่เกิดจากการดูดซับไอออนของสารลดแรงตึงผิวชนิดบวก [32]



ภาพที่ 2-25 ประจุบนผิวที่เกิดจากการดูดซับไอออนของสารลดแรงตึงผิวชนิดลบ [32]

2.12.2.4 ความเป็นกรดเป็นเบสของตัวกลาง ถ้าอนุภาคเป็นกลางประจุบนผิวของอนุภาคสามารถเป็นได้ทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นเบสของตัวกลาง เมื่อตัวกลางเป็นเบส อนุภาคจะแสดงประจุลบที่ผิว โดยไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากผิวของอนุภาคจะแตกตัวไปรวมกับไฮดรอกซิลไอออน ของน้ำ ในขณะที่เมื่อตัวกลางเป็นกรด อนุภาคจะแสดงประจุบวก

ที่ผิวโดยการเกิดพันธะระหว่างไฮโดรเจนไอออนของตัวกลาง กับหมู่ไฮดรอกซิลไอออนบนผิวของอนุภาค

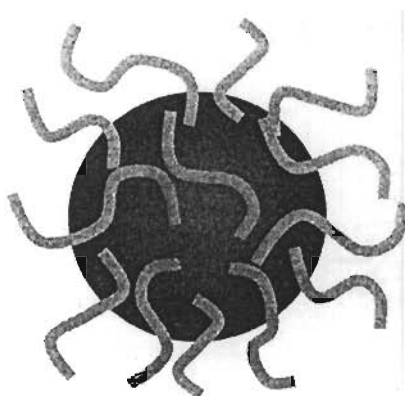
2.12.3 การรักษาเสถียรภาพของคอลลอยด์ [32]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าในการรักษาเสถียรภาพของคอลลอยด์ คือ การทำให้แรงผลักทางไฟฟ้า มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดชนิดวานเดอร์วาลส์ ซึ่งกลไกสำคัญ 2 กลไก ที่มีผลต่อการกระจายตัวของคอลลอยด์ คือ แรงผลักทางไฟฟ้า (Electrostatic Repulsion Force) และแรงผลักชนิดแรงสเตอริก (Steric Force)

2.12.3.1 แรงสเตอริก

เป็นแรงผลักที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลของโพลิเมอร์ที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาค ตามภาพที่ 2-25 แรงผลักจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเข้าหากันมากจนกระทั่งโมเลกุลของโพลิเมอร์ซ้อนทับกัน

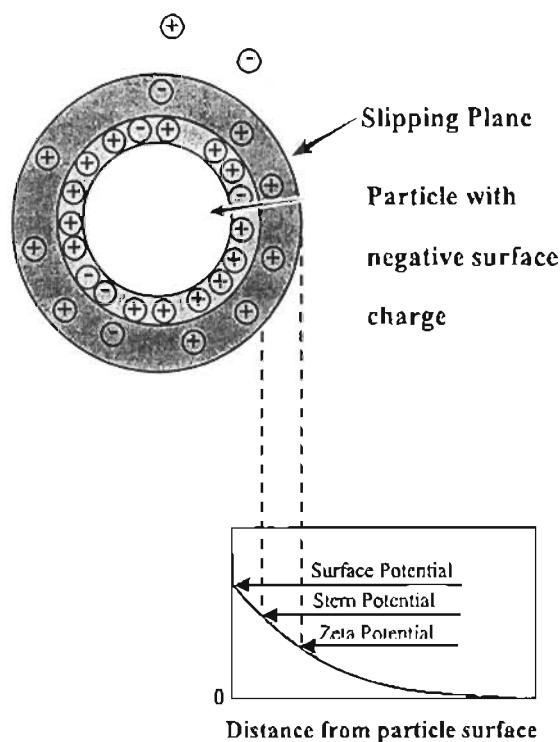
โพลิเมอร์ที่ใช้ในการช่วยกระจายตัวของสารจะต้องมี 2 หมู่ทางเคมีที่แตกต่างกัน หมู่แรกจะต้องชอบเกาะบนอนุภาค อีกหมู่หนึ่งชอบที่จะยืดตัวออกไปยังตัวทำละลาย ดังนั้นการผลักจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้ การเกาะของโพลิเมอร์บนอนุภาค การมีขนาดของระยะยืดของโพลิเมอร์ที่มาก และการเลือกตัวทำละลายที่สนับสนุนให้โพลิเมอร์ยืดตัวออกมา การที่อนุภาคเคลื่อนตัวเข้าหากัน โมเลกุลก็จะซ้อนทับกัน เหนี่ยวนำให้ตัวทำละลายเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่โมเลกุลซ้อนทับกัน เกิดเป็นแรงผลกออสโมซิส ดันให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากกัน



ภาพที่ 2-26 แรงสเตอริก [32]

2.12.3.2 แรงผลักทางไฟฟ้า

เสถียรภาพของคอลลอยด์เกิดจากการผลักกันทางไฟฟ้าของชั้นของประจุ (Electrical Double Layer) ที่ล้อมรอบอนุภาคอยู่ แสดงตามภาพที่ 2-27



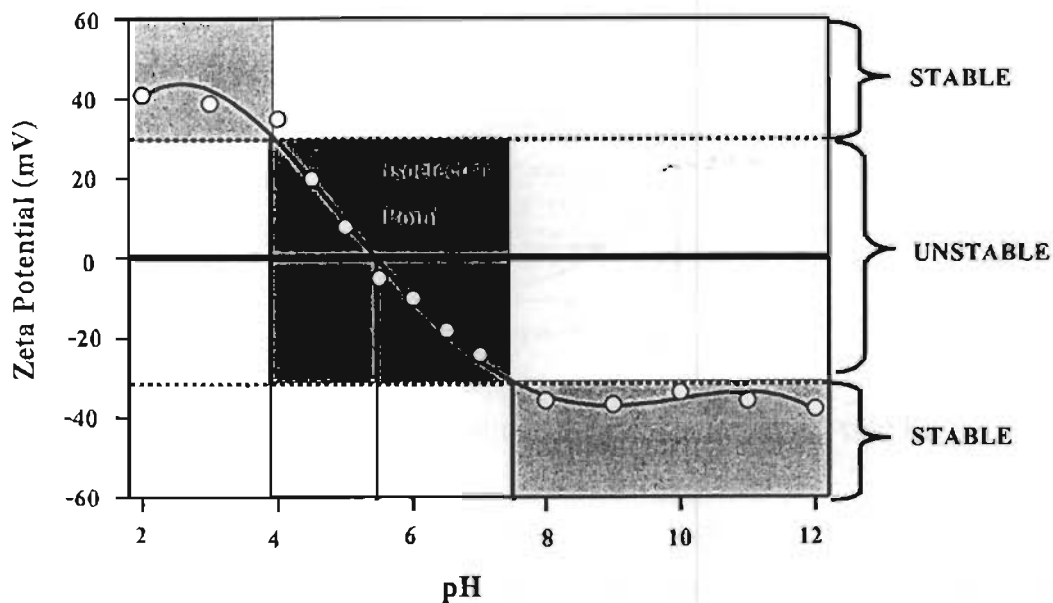
ภาพที่ 2-27 ชั้นของประจุที่ล้อมรอบอนุภาค (Electrical Double Layer) [32]

จากภาพแสดงให้เห็นว่าเกิดการกระจายตัวของประจุบวกล้อมรอบอนุภาคอยู่ ซึ่งชนิดของประจุที่ล้อมรอบอนุภาคอยู่นั้นจะตรงกันข้ามกับประจุที่ผิวของอนุภาค (Surface Charge) โดยชั้นของประจุแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคือ ขอบเขตใน (Inner Region) หรือ ชั้นสเตอร์น (Stern Layer) เป็นชั้นที่มีประจุหนาแน่น และ ขอบเขตนอก (Outer Region) หรือ ชั้นแพร่ (Diffuse Layer) เป็นชั้นที่ความหนาแน่นของประจุลดลง ในการวัดขนาดของประจุที่ล้อมรอบอนุภาคอยู่นั้นสามารถทำได้โดยการวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta Potential) ซึ่งการมีขนาดของประจุมาก การผลักกันระหว่างอนุภาคก็จะมีมากด้วยเช่นกัน

2.12.4 ศักย์ซีต้า [32]

ศักย์ซีต้าเป็นค่าที่แสดงถึงเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์ โดยที่ขนาดของศักย์ซีต้าจะเป็นตัวบ่งชี้ว่า อนุภาคในระบบคอลลอยด์เกิดการกระจายตัวหรือรวมตัวกันอยู่ ถ้าระบบคอลลอยด์มีขนาดของศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบมากๆ หมายถึง อนุภาคในระบบคอลลอยด์เกิดแรงผลักซึ่งกันและกันทำให้เกิดการกระจายตัว แต่ถ้าระบบคอลลอยด์มีขนาดของศักย์ซีต้าต่ำ หมายถึง อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อศักย์ซีต้า คือค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ภาพที่ 2-28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ซีต้าและค่าความเป็นกรดเป็นด่าง จากรูปแสดงให้เห็นว่า ที่ค่าศักย์ซีต้ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ จะเกิดการกระจายตัวของอนุภาค ที่ศักย์ซีต้ามีค่าอยู่ระหว่าง +30 ถึง -30 มิลลิโวลต์ จะเกิด

การรวมตัวกันของอนุภาค และจากรูปสมมุติว่าอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางมีศักย์ซีต้าเป็นลบ ถ้าเติมเบสลงไปทำให้มีประจุลบเพิ่มขึ้นที่ชั้นของประจุ หรือถ้าเติมกรดลงไปไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเข้าไปสะเทิน (Neutralization) ประจุลบที่ชั้นของประจุ และการเติมกรดเพิ่มลงไปเรื่อยๆ จะทำให้ค่าศักย์ซีต้าเป็นบวก จุดที่ศักย์ซีต้าเป็น 0 มิลลิโวลต์ เรียกว่า จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric Point) ซึ่งเป็นจุดที่อนุภาคเกิดการรวมตัวกันแน่นที่สุด หรือเป็นจุดที่ระบบคอลลอยด์มีเสถียรภาพน้อยที่สุดนั่นเอง



ภาพที่ 2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ซีต้าและพีเอช [32]

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Konsowa [33] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการลดสีของน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสีแดง (Isma Fast Red 8B) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราการลดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอโซนในก๊าซเฟส และค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสี นอกจากนี้อัตราการลดสีจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ และพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการกำจัดสีตามสมการ

$$t_0 = mc \quad (2-44)$$

โดย	t_D	คือ	ระยะเวลาต่ำสุดในการกำจัดสี (min)
	c	คือ	ความเข้มข้นของสีเริ่มต้น (ppm)
	m	คือ	ค่าคงที่

Antonio และคณะ [34] ได้ศึกษากระบวนการทำงานร่วมกันของกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) และกระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process) ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic Organic Compound) ในการศึกษาครั้งนี้ให้เห็นว่าการรวมกระบวนการทั้งสองเข้าด้วยกัน จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการใช้กระบวนการใดกระบวนการหนึ่งเพียงอย่างเดียว ใช้วิธีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Chemical Oxidation) ในการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สารอินทรีย์ที่เป็นพิษและสารที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยา (Nonbiodegradable) กลายเป็นสารที่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยาได้ (Biodegradable) จากนั้นจึงบำบัดน้ำเสียต่อด้วยกระบวนการทางชีววิทยา ในกระบวนการทางเคมีปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างออกซิแดนต์กับสารอินทรีย์ ค่าพีเอช ส่วนกระบวนการทางชีววิทยานั้นขึ้นอยู่กับ ปริมาณออกซิเจน ค่าพีเอช ศักย์รีดอกซ์ (Redox Potential)

Alfajara และคณะ [35] ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียของโรงกลั่นโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ (Organic Matter) และการลดลงของสีของน้ำเสีย (Decolorization) ที่เกิดจากเม็ดสี (Pigment) ที่เรียกว่า เมลานอยดิน (Melanoidins) ซึ่งจากการทดลองสามารถกำจัดซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ได้ 16 เปอร์เซ็นต์ กำจัดสีได้ 80 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มค่า บีโอดี/ซีโอดี ได้ 40 เปอร์เซ็นต์ (จาก 0.3 เป็น 0.5) ซึ่งจะเห็นว่าโอโซนมีผลโดยตรงในการกำจัดสี และพัฒนาการย่อยสลายทางชีววิทยา จึงเสนอว่าควรใช้กระบวนการโอโซนเนชั่นเป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าระบบบำบัดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียให้ดียิ่งขึ้น

Chalor [36] ได้ศึกษาการกำจัดสีของโรงงานฟอกย้อมโดยใช้โอโซนและการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium Chloride) พบว่าโอโซนมีความสามารถในการกำจัดสีแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยสามารถลดสีรีแอคทีฟ (Reactive) ได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ สีแวต (Vat) สามารถลดได้ 98 เปอร์เซ็นต์ และสีดิสเพิร์ส (Disperse) สามารถลดได้ 97 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นด้วย รวมทั้งพบว่าประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี จะขึ้นอยู่กับปริมาณของโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยาและระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วย ซึ่งสีแต่ละชนิดจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีแตกต่างกัน

Tzizi และคณะ [37] ได้ศึกษาการใช้โอโซนช่วยในการบำบัดขั้นต้น (Preozonation) ของน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อม ในการทดลองได้นำเอาน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมหลายชนิดมาทำการทดสอบ นอกจากนี้ยังใช้วิธีการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน พบว่าหากนำน้ำเสียดิบเข้าทำปฏิกิริยากับโอโซนโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10-15 นาที สีของน้ำเสียจะกลายเป็นสีออกเหลือง คิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ของประสิทธิภาพในการลดสี โดยที่ค่าซีโอดีและค่าบีโอดีไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 20-30 นาที พบว่าสามารถลดค่าซีโอดี ได้ 40-45 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าบีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาค่าความเป็นกรด-เบส จะเพิ่มขึ้นจาก 8.2 เป็น 8.6 ในขณะเดียวกันไม่พบว่ามีตะกอนเพิ่มขึ้น

Sheng และ Wen [38] ได้ศึกษาการใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อมในถังปฏิกิริยาแบบแพ็คเบด (Packed-Bed) จากการศึกษาพบว่าโอโซนสามารถกำจัดสีโดยใช้เวลาน้อยกว่า 5 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าเพิ่มหน่วยบำบัดโดยใช้กระบวนการตกตะกอนและระบบบำบัดทางชีวภาพโดยใช้อากาศจะสามารถลดค่าซีโอดี ได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่า

Beszedits [39] ได้ศึกษาการใช้โอโซนในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมพบว่า โอโซนสามารถกำจัดสีได้เป็นอย่างดี ช่วยลดระดับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ช่วยให้สารต่างๆ ในน้ำเสียสามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น กำจัดฟีนอล (Phenol) และนอกจากนี้ยังช่วยในการฆ่าเชื้อโรคได้อีกด้วยในส่วนของการกำจัดสีประสิทธิภาพ ของการกำจัดจะขึ้นกับชนิดของสีที่ใช้และความซับซ้อนของโครงสร้างสารอินทรีย์

Malik และ Saha [40] ได้ศึกษาการใช้เฟนตอนรีเอเจนท์ (Fenton's Reagent) เพื่อบำบัดสีย้อม ไดเรคท์ (Direct Dye) 2 ชนิด คือ บี 54 (B54) และอาร์ 31 (R31) พบว่าปฏิกิริยาในการย่อยสลาย สีย้อมแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกสีย้อมถูกย่อยสลายได้รวดเร็วกว่าขั้นที่สอง ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่ออัตราการย่อยสลายสีย้อม ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ($\text{ferrous ion, Fe}^{2+}$) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, H_2O_2) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และการเติมคลอไรด์ไอออน (Chloride Ion, Cl^-) และซัลเฟตไอออน (Sulfate Ion, SO_4^{2-}) จากการศึกษาพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการสลายตัวของสีย้อม คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยที่สีย้อมจะถูกออกซิไดซ์ได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอช เท่ากับ 3 และที่สัดส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ : สีย้อม เท่ากับ 1 : 32.9 : 2.4 และ 1 : 16.5 : 1.8 มิลลิโมลาร์ ซึ่งที่สภาวะนี้สามารถกำจัดสีได้ 97 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และสามารถกำจัดซีโอดีได้ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที การสลายตัวของสีย้อมทั้งสองชนิดนี้เป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับที่หนึ่ง (First Order Kinetic Model)

ของความเข้มข้นของสีย้อมในขั้นที่สองของการออกซิเดชัน ซึ่งแบบจำลองนี้มีประโยชน์ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานหมักพิมพ์ ซึ่งน้ำเสียประกอบไปด้วยสีอะโซ่ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยาได้ (Non-Biological) [41] ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดขั้นต้นที่มีประสิทธิภาพเพื่อกำจัดสีและความขุ่นของน้ำเสีย นอกจากนั้นเป็นการเพิ่มการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีววิทยา กระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ได้ศึกษาในงานวิจัยคือ กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นโอโซนสามารถกำจัดสีได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นโอโซนจะเข้าไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยา ให้กลายเป็นสารที่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยาได้ เป็นผลให้ค่าบีโอดี/ซีโอดี เพิ่มขึ้น [35] ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดทางชีววิทยาต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากโรงงานหมักพิมพ์ โดยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการโอโซนชั้น
2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้ศักย์ซีต้าเป็นค่าที่แสดงถึงเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 แสดงดังภาพที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

3.2.1 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator)

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เครื่องผลิตโอโซนแบบโคโรนาดีสชาร์จ ของบริษัทนอร์กา (Norca) รุ่น Nk-200

3.2.2 ถังปฏิกรณ์ (Reactor)

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทำมาจากอะคริลิกใส (Acrylic) โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร มีปริมาตรบรรจุประมาณ 1,256 มิลลิลิตร

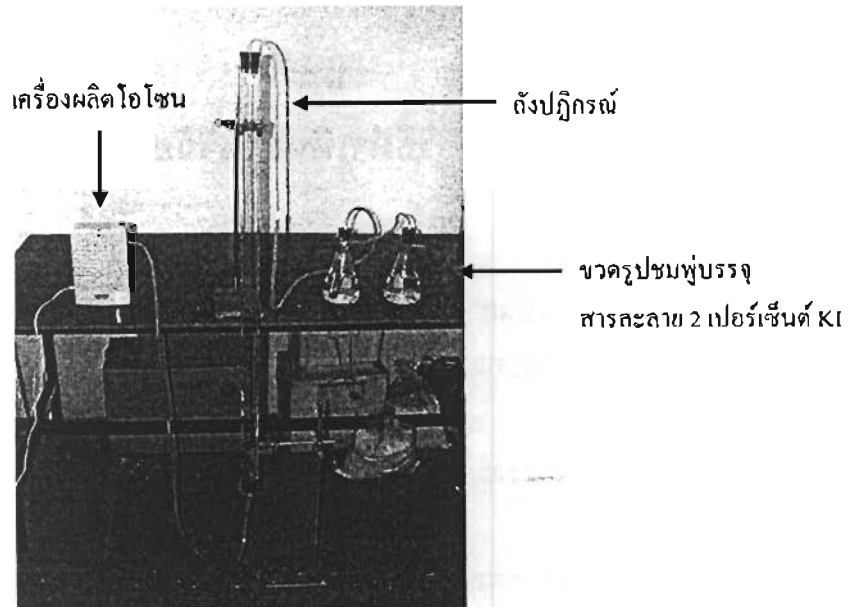
3.2.3 หัวพ่นอากาศ

ทำจากเซรามิกสีขาวเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม สามารถพ่นฟองอากาศขนาดเล็กให้แก่ระบบบำบัดโดยต่อหัวพ่นอากาศกับสายของก๊าซโอโซน ที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่บริเวณก้นถัง

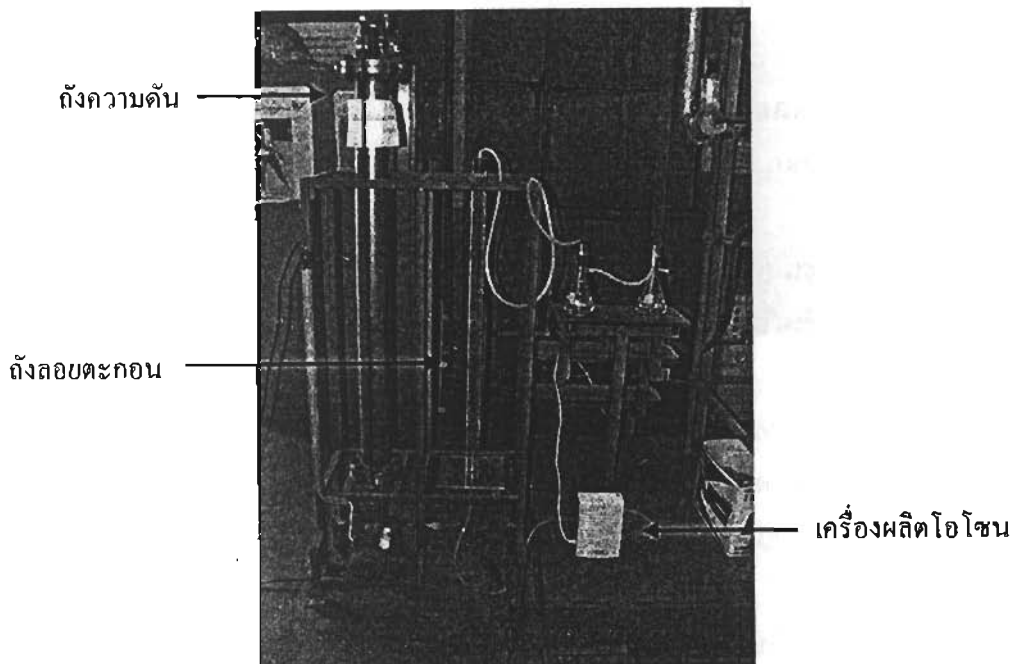
3.2.4 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter) ชนิดโรตารีมิเตอร์

3.2.5 ชุดอุปกรณ์ระบบลอยตะกอน ประกอบด้วย

3.2.5.1 ถังความดัน (Pressure Vessel)



ภาพที่ 3-1 ระบบบำบัดด้วยโอโซนที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 3-2 ระบบบำบัดด้วยโอโซนรวมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

เป็นถังสแตนเลส มีความหนา 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 96 มิลลิเมตร สูง 130 เซนติเมตร ปริมาตรบรรจุ 9.4 ลิตร

3.2.5.2 ถังลอยตะกอน (Flotation Tank)

ถังลอยตะกอนทำมาจากอะคริลิกใส (Acrylic) โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร มีปริมาตรบรรจุประมาณ 1,256 มิลลิลิตร กันถึงปิดด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 8 มิลลิเมตร เจาะรูเพื่อต่อท่อระบาย (Drain) ท่อน้ำเข้าจากถังความดัน และท่อที่ต่อกับหัวพ่นอากาศกับสายของก๊าซโอโซนที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซน

3.2.5.3 ปั๊มน้ำแบบเหวี่ยง (Centrifugal Pump)

เป็นปั๊มน้ำ ของบริษัททาโน (Tano) รุ่น PBT 50 ทำให้น้ำหมุนวนภายในถังความดัน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการละลายของอากาศในน้ำ

3.2.5.4 เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor)

3.2.5.5 วาล์วระบายความดัน (Pressure Relief Valve)

เป็นวาล์วที่ช่วยป้องกันการมีความดันภายในถังมากเกินไป โดยติดตั้งไว้ที่ด้านบนของถังความดัน

3.2.5.6 วาล์วเข็ม (Needle Valve)

เป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของของไหลได้อย่างละเอียด เนื่องจากมีรูออริฟิส (Orifice) ขนาดเพียง 4.4 มิลลิเมตร ของไหลจึงไหลได้ทีละน้อย โดยในการทดลองทำการติดตั้งไว้ที่ทางเข้าของอากาศสู่ถังความดัน เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศให้มีปริมาณตามที่ต้องการ เพื่อให้ระบบการเติมอากาศเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

3.2.5.7 วาล์วกันกลับ (Check Valve)

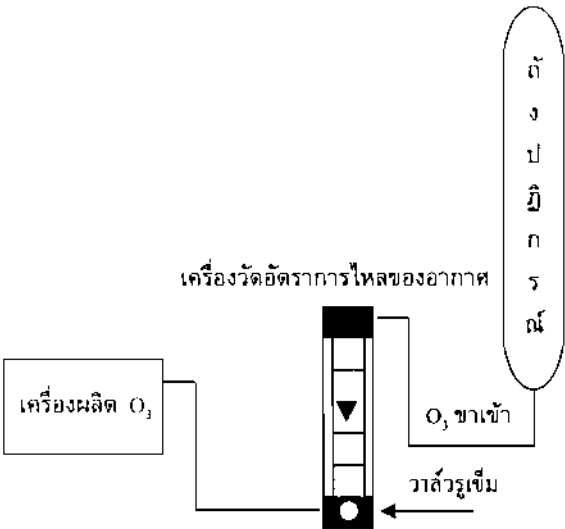
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของของไหล โดยในการทดลองได้ติดตั้งไว้ที่ทางเข้าของอากาศที่เข้าสู่ถังความดัน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำในถังความดันไหลเข้าไปในทางเดินอากาศ ซึ่งอาจทำให้เครื่องอัดอากาศเสียหายได้

3.2.5.8 บอลวาล์ว (Ball Valve)

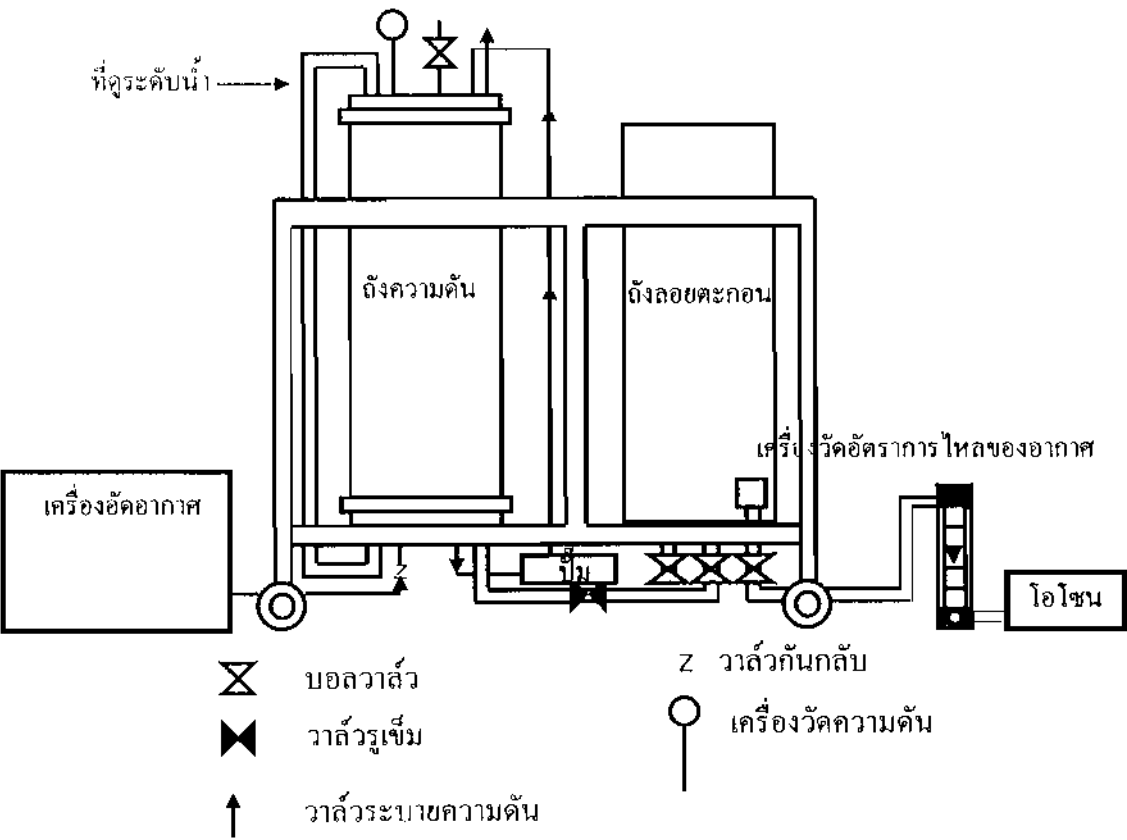
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการหยุดไหลและการเริ่มไหลของของไหล เป็นการปรับการไหลอย่างคร่าวๆ ในการทดลองทำการติดตั้งไว้ที่ด้านบนของถังความดัน โดยจะเปิดวาล์วเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ถังความดัน และปิดวาล์วเมื่อเติมอากาศจากเครื่องอัดอากาศเข้าสู่ถังความดัน

3.2.5.9 ที่ดูระดับน้ำ (Sight Glass)

เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดระดับน้ำภายในถังความดัน โดยทำการติดตั้งไว้ที่ด้านข้างและขนานตามความยาวของถังความดัน ทั้งนี้เพราะไม่สามารถมองเห็นระดับน้ำภายในถังความดันสแตนเลส



ภาพที่ 3-3 แผนผังระบบบำบัดด้วยโอโซน



ภาพที่ 3-4 แผนผังระบบบำบัดด้วยโอโซนรวมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ

ได้ จึงต้องติดตั้งที่ระดับน้ำเพื่อให้มองเห็นระดับได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เข้าและออกให้สมดุลกัน

3.2.6 เครื่องปฏิกรณ์ชีโอดี (COD Reactor) ของบริษัทแฮช (HACH) รุ่น 45600

3.2.7 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ของบริษัทแฮช (HACH) รุ่น DR/2010 สำหรับวัดค่าซีโอดี

3.2.8 เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter) ของบริษัทเจนเวย์ (JENWAY) รุ่น 6035

3.2.9 เครื่องวัดศักย์ซีต้า (Zetapotential Analyzer) ของบริษัทมาลเวอร์น (MALVERN) รุ่น 3000 HSA

3.2.10 เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter) ของบริษัทเมทเลอร์ โทเลโด (METTLER TOLEDO)

3.2.11 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ของบริษัทยูนิแคม (UNICAM) รุ่น UV 500 สำหรับวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.2.12 เครื่องชั่งน้ำหนัก ของบริษัทเมทเลอร์ โทเลโด (METTLER TOLEDO) รุ่น PG 503-S

3.2.13 เตาอบแห้ง

3.2.14 เครื่องดูดอากาศ ของบริษัทเอดเวิร์ด (EDWARDS) รุ่น E2M18

3.2.15 กรวยบุงเนอร์

3.2.16 โถทำแห้ง

3.2.17 อุปกรณ์จาร์เทสท์ ของบริษัทไอก้า (IKA) รุ่น RER

3.2.18 เครื่องแก้วสำหรับงานวิเคราะห์ปริมาตร (Volumetric Analysis)

3.2.19 นาฬิกาจับเวลา

3.2.20 กระดาษกรองใยแก้ว

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD Reagent) ของบริษัทแฮช (Hach)

3.3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไอโชนที่ผลิตจากเครื่องผลิตไอโชน ได้แก่

3.3.2.1 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide, KI) 2 เปอร์เซ็นต์ ของบริษัท เอแฉ็ค ฟายเคม (AJAX FINECHEM) เกรดงานวิเคราะห์

3.3.2.2 สารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4) 1 นอร์มัล ของบริษัท เจที บาค-เกอร์ (J.T. BAKER) เกรดงานวิเคราะห์

3.3.2.3 สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodiumthiosulphate, $Na_2S_2O_3$) 0.1 นอร์มัล ของบริษัท ฟลูก้า (FLUKA) เกรดการวิเคราะห์

3.3.2.4 น้ำแป้ง (Strach) ของบริษัทฟลูก้า (FLUKA) เกรดงานวิเคราะห์

3.3.3 สารเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate, $FeSO_4$) สำหรับตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์

3.3.4 สารโพแทสเซียมเปอร์มังกาเนต (Potassium Permanganate, KMnO_4) สำหรับสร้างกราฟมาตรฐานสี ของบริษัท ยูนิวาร์ (UNIVAR) เกรดงานวิเคราะห์

3.3.5 สารเคมีสำหรับปรับค่าพีเอช ได้แก่

3.3.5.1 สารละลายกรดซัลฟูริก ของบริษัท เจที บาคเกอร์ (J.T. BAKER) เกรดงานวิเคราะห์

3.3.5.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) ของบริษัท เมอร์ค (MERCK) เกรดงานวิเคราะห์

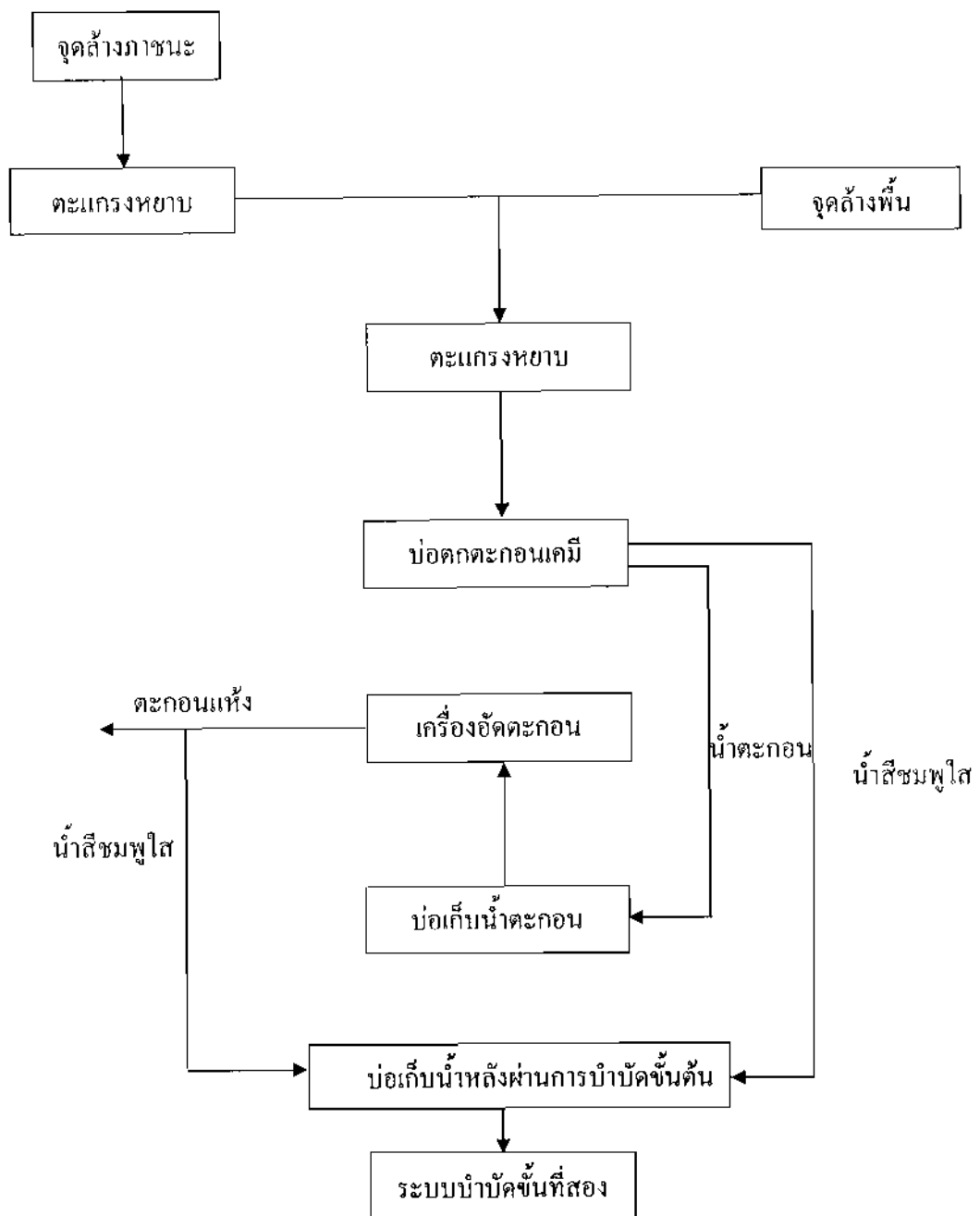
3.3.6 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐานความขุ่น ได้แก่

3.3.6.1 สารไฮดราซีนซัลเฟต (Hydrazine Sulfate, $(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$) ของบริษัท คาร์โล เออบา (CARLO ERBA) เกรดงานวิเคราะห์

3.3.6.2 สารเฮกซะเมทิลีนเตตรามีน (Hexamethylene Tetramine, $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$) ของบริษัท คาร์โล เออบา (CARLO ERBA) เกรดงานวิเคราะห์

3.4 เก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียส่งเคราะห์จากโรงงานอินเดอริอิง จ. ฉะเชิงเทรา น้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการล้างภาชนะที่ใช้ในกระบวนการ ดังนั้นน้ำเสียจึงประกอบไปด้วยหมักฐานน้ำหรือหมักเฟล็คโซ (Flexo) ภาพที่ 3-5 แสดงแผนผังระบบบำบัดขั้นต้นของโรงงานซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการทางกายภาพและกระบวนการทางเคมี โดยในขั้นแรกน้ำเสียจะผ่านตะแกรงหยาบเพื่อดักเศษขยะต่างๆ ที่ไหลมากับน้ำเสีย จากนั้นจึงสูบน้ำเสียไปยังบ่อดกตะกอน โดยสารเคมีที่เติมลงไป คือ เฟอร์รัสซัลเฟต เป็นสารสร้างตะกอน (Coagulant) จากนั้นกวนเร็วเป็นเวลา ประมาณ 5 นาที เพื่อให้ น้ำเสียและสารสร้างตะกอนผสมกัน ต่อมาจะกวนอย่างช้าๆ เป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อให้เกิดสภาพการรวมตะกอน (Flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็กๆ กับสารสร้างตะกอน จะได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ สาเหตุที่ต้องทำการกวนอย่างช้าๆ เพราะไม่ให้สภาพการเกาะตัวกันเกิดการแตกหลุดจากกัน จากนั้นรอให้ตกตะกอนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากตกตะกอนแล้วจะทำการสูบน้ำที่ผ่านการตกตะกอนที่อยู่ส่วนบนของบ่อดกตะกอน ซึ่งมีลักษณะสีชมพูใสไปยังบ่อเก็บน้ำหลังผ่านการบำบัดขั้นต้น และสูบน้ำตะกอนที่ส่วนล่างของบ่อดกตะกอน ซึ่งมีลักษณะเป็นน้ำสีน้ำเงินเข้มไปยังบ่อเก็บน้ำตะกอน



ภาพที่ 3-5 แผนผังระบบบำบัดขั้นต้นของโรงงานอินเตอร์อิง

จากนั้นสูบน้ำตะกอนนี้ไปยังเครื่องอัดตะกอน ทำให้ได้น้ำสีชมพูใส ซึ่งจะถูกลูบไปยังบ่อกักน้ำหลังการบำบัดขั้นต้น และตะกอนแห้งสีน้ำเงินที่ได้ทางโรงงานจะนำไปทิ้ง จากนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจะถูกนำไปบำบัดต่อในขั้นต่อไป

ในงานวิจัยได้เก็บตัวอย่างน้ำเสีย ตั้งแต่วันที่ 10 พ.ย. 2547 ถึงวันที่ 15 ธ.ค. 2547 เป็นจำนวน 6 ครั้ง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังตกตะกอนด้วยสารเฟอร์รัสซัลเฟต

ณ. ตำแหน่ง บ่อดกตะกอนเคมี จากนั้นนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ (รายละเอียดการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก ก)

1. ค่าซีไอดี โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Close Reflux) ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์
2. ค่าสี โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร
3. ค่าความขุ่น โดยเครื่องวัดความขุ่น
4. ค่าพีเอช โดยเครื่องวัดค่าพีเอช
5. ค่าศักยภาพซีต้า โดยเครื่องวัดศักยภาพซีต้า
6. ปริมาณตะกอนแขวนลอย (Suspended Solids) โดยวิธีการกรอง

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

3.5.1.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนตกตะกอนด้วยสารเฟอร์รัสซัลเฟต โดยการหาความเข้มข้นของหมักเฟลโซ เพื่อให้ได้ค่าซีไอดีเท่ากับค่าซีไอดีเฉลี่ยก่อนตกตะกอนของน้ำเสียจากโรงงานซึ่งมีค่าเท่ากับ 16,367 มิลลิกรัม/ลิตร มีวิธีทดสอบดังนี้

ก) เติมน้ำ 1,000 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 8 ใบ

ข) เติมหักเฟลโซปริมาณ 5 10 12 14 16 18 20 และ 22 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ แล้วนำเข้าเครื่องจาร์เทส

ค) เปิดเครื่องจาร์เทสโดยปรับความเร็วรอบเท่ากับ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเปิดแต่ละบีกเกอร์ไปวัดค่าซีไอดี ผลของค่าซีไอดีแสดงในภาคผนวก ข สรุปได้ว่า ความเข้มข้นของหมักเฟลโซ 18 มิลลิลิตร/ลิตร จะให้ค่าซีไอดีเท่ากับ 16,500 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าซีไอดีเฉลี่ยก่อนตกตะกอนของโรงงานมากที่สุด

3.5.1.2 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์หลังตกตะกอนด้วยสารเฟอร์รัสซัลเฟต โดยการหาปริมาณของสารเฟอร์รัสซัลเฟต เพื่อให้ได้สีของน้ำเสียสังเคราะห์หลังตกตะกอนใกล้เคียงกับสีของน้ำเสียหลังตกตะกอนของโรงงาน มีวิธีทดสอบดังนี้

ก) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนตกตะกอน โดยเติมน้ำ 1,000 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 5 ใบ จากนั้นเติมหักเฟลโซ 18 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ แล้วจึงนำเข้าเครื่องจาร์เทส

ข) เติมสารเฟอร์รัสซัลเฟต ปริมาณ 1 2 3 4 และ 5 กรัม ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ

ค) เปิดเครื่องจาร์เทส โดยเครื่องจะปรับความเร็วรอบตอนแรกเท่ากับ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเครื่องจะปรับความเร็วรอบไปที่ 40 รอบต่อนาที

เป็นเวลา 15 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที จากการสังเกตสรุปได้ว่าการเติมสารเฟอร์ริซัลเฟตปริมาณ 2 กรัม จะทำให้ได้สีของน้ำเสียสังเคราะห์หลังตกตะกอนใกล้เคียงกับสีของน้ำเสียหลังตะกอนของโรงงานมากที่สุด

ง) ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ส่วนใสมาวิเคราะห์หาค่าซีโอดี ซึ่งได้ค่าซีโอดีเท่ากับ 1,950 มิลลิกรัม/ลิตร

จากที่กล่าวข้างต้นว่า ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนั้นจะแสดงวิธีการทดลองในส่วนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

3.5.2 วิธีการทดลองในส่วนที่ 1 มีขั้นตอนดังนี้

3.5.2.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองส่วนที่ 1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไอโซเนชั่น ประกอบด้วยจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัว คือ ภาวะสารอินทรีย์ ค่าพีเอช และเวลา จากตารางที่ 2.5 α_0 มีค่าเท่ากับ 1.682 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงระยะห่างของตัวแปรเข้ารหัส (Code Value) ระหว่างจุดศูนย์กลางกับแนวแกน ดังนั้นตัวแปรจะถูกนำเข้ารหัสโดยกำหนดระดับต่ำ กลาง และสูง ของรหัสเป็น -1.682 0 และ +1.682 ตามลำดับ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริง (Actual Value) และค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ตามตารางที่ 3-1

3.5.2.2 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

ก) หาปริมาณไอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไอโซน โดยวิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method) แสดงดังภาพที่ ก-3 (รายละเอียดการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก ก)

ข) ต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 3-3

ค) เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งประกอบไปด้วยหมึกฐานน้ำหรือหมึกเฟล็คโซ ปริมาตร 18 มิลลิลิตร กับน้ำ 1 ลิตร คนให้ละลายเข้ากัน และใส่สารเฟอร์ริซัลเฟตลงไป 2 กรัม เพื่อทำให้น้ำเสียสังเคราะห์ตกตะกอน จากนั้นแยกน้ำเสียสังเคราะห์และตะกอนออกจากกัน

ตารางที่ 3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัส				
	-1.682	-1.000	0	+1.000	+1.682
ภาวะ(mg/l)	650	915	1300	1700	1950
พีเอช	3	5	7	9	11
เวลา (นาที)	10	20	35	50	60

จากตารางที่ 2-5 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนตัวแปรอิสระเท่ากับ 3 ตัว จะทำให้เกิดจำนวนการทดลองรวมทั้งหมด 20 การทดลอง ตามตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 การออกแบบส่วนประสมกลางในการทดลองส่วนที่ 1 สำหรับตัวแปรอิสระ 3 ตัว

ลำดับที่	ค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระ		
	ภาระสารอินทรีย์ (X_1)	พีเอช (X_2)	เวลา (X_3)
1	0	0	0
2	0	-1.682	0
3	-1	1	-1
4	0	0	1.682
5	0	0	0
6	0	0	0
7	-1	-1	1
8	1.682	0	0
9	1	-1	-1
10	0	0	0
11	1	1	-1
12	0	1.682	0
13	0	0	0
14	1	1	1
15	0	0	0
16	0	0	-1.682
17	-1	-1	-1
18	-1.682	0	0
19	-1	1	1
20	1	-1	1

ง) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการแยกตะกอนแล้ว ไปตรวจวัดซีไอดี พบว่า ซีไอดี มีค่าเท่ากับ 1,950 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้นี้มาเจือจางเพื่อให้ได้ซีไอดี ตามตารางที่ 3-1 โดยเจือจางน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ 35 50 75 และ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ซึ่งจะทำให้ได้ซีไอดี เท่ากับ 650 915 1300 และ 1,700 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

จ) ทำการทดลอง 20 การทดลองตามสภาวะของแต่ละการทดลองตามตารางที่ 3-2 ซึ่งในแต่ละการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องผลิตโอโซนคงที่ที่ 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที่ โดยการปรับวาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งในการทดลองแต่ละการทดลองจะใช้ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 500 มิลลิตร และนำน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการบำบัดมาวิเคราะห์ค่าสี

ฉ) บันทึกผลการทดลอง และคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละการทดลอง ดังสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{\text{ค่าสีก่อนโอโซน} - \text{ค่าสีหลังโอโซน}}{\text{ค่าสีก่อนโอโซน}} \times 100 \quad (3-1)$$

ช) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปคำนวณและวิเคราะห์ผล โดยวิธีการทางสถิติ

ซ) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

ฌ) ทำนายผลตอบจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ญ) หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่น และทำการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าว

3.5.3 วิธีการทดลองในส่วนที่ 2 มีขั้นตอนดังนี้

3.5.3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองส่วนที่ 2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับการลอยตะกอน ด้วยหลักการละลายของอากาศ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ประกอบด้วยจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนวอเตอร์ ค่าพีเอช และเวลา จากตารางที่ 2.5 α_0 มีค่าเท่ากับ 1.682 ดังนั้นตัวแปรจะถูกนำเข้ารหัสโดยกำหนดระดับต่ำ กลาง และสูง ของรหัสเป็น -1.682 0 และ +1.682 ตามลำดับ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริง (Actual Value) และค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ตามตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัส				
	-1.682	-1.000	0	+1.000	+1.682
อัตราส่วนวอเตอร์ (%)	5	10	18	25	30
พีเอช	3	5	7	9	11
เวลา (นาที)	25	32	43	53	60

จากตารางที่ 2-5 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนตัวแปรอิสระเท่ากับ 3 ตัว จะทำให้เกิดจำนวนการทดลองรวมทั้งหมด 20 การทดลอง ตามตารางที่ 3-4

3.5.3.2 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

ก) หาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน โดยวิธีไอโอโดเมตริก

ข) เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งประกอบไปด้วยหมักฐานน้ำหรือหมักเฟล็คโซ ปริมาตร 18 มิลลิลิตร กับน้ำ 1 ลิตร คนให้ละลายเข้ากัน และใส่สารเฟอร์ริลเฟดลงไป 2 กรัม เพื่อทำให้น้ำเสียสังเคราะห์ตกตะกอน จากนั้นแยกน้ำเสียสังเคราะห์และตะกอนออกจากกัน

ตารางที่ 3-4 การออกแบบส่วนประสมกลางในการทดลองส่วนที่ 2 สำหรับตัวแปรอิสระ 3 ตัว

ลำดับที่	ค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระ		
	อัตราส่วนวอเตอร์ (X ₁)	พีเอช (X ₂)	เวลา (X ₃)
1	1.682	0	0
2	0	0	0
3	-1	-1	1
4	0	0	0
5	-1.682	0	0
6	0	0	0
7	-1	-1	-1
8	-1	1	1
9	0	0	1.682
10	0	-1.682	0

ตารางที่ 3-4 (ต่อ)

ลำดับที่	ค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระ		
	อัตราส่วนวอเตอร์ (X_1)	พีเอช (X_2)	เวลา (X_3)
11	0	1.682	0
12	1	1	-1
13	-1	1	-1
14	0	0	0
15	1	1	1
16	0	0	0
17	0	0	0
18	1	-1	-1
19	1	-1	-1
20	0	0	-1.682

ค) นำน้ำเสียสังเคราะห์มาวิเคราะห์ความขุ่นและค่าศักยภาพซีต้า

ง) ต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 3-4

จ) เติมน้ำเข้าถังความดัน 5 ลิตร จากนั้นอัดอากาศจากเครื่องอัดอากาศให้เข้าสู่ถังความดัน 4 บาร์เกจ

ฉ) เปิดปั๊มน้ำให้น้ำไหลวนภายในถังความดันเป็นเวลา 10 นาที

ช) นำน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เตรียมได้จากข้อ 3.5.2.2.2 500 มิลลิลิตร มาปรับพีเอช ตามตารางที่ 3-4 จากนั้นวิเคราะห์ค่าศักยภาพซีต้า แล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับพีเอชแล้วมาใส่ในถังลอยตะกอน

ซ) อัดโอโซนเข้าสู่ถังลอยตะกอนโดยใช้เวลาตามตารางที่ 3-4 ซึ่งในการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของโอโซนให้คงที่ที่ 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที โดยการปรับวาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล จากนั้นเปิดวาล์วจากด้านล่างถังลอยตะกอนเพื่อนำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าศักยภาพซีต้าอีกครั้ง

ณ) ปรับอัตราส่วนวอเตอร์ ตามตารางที่ 3-4 เพื่อลอยตะกอน โดยเริ่มจากปรับวาล์วเข็มให้อัตราการไหลของน้ำจากถังความดันเข้าสู่ถังลอยตะกอน เท่ากับ 500 มิลลิลิตร/นาที จากนั้นจึงเปิดวาล์ว เพื่อนำน้ำจากถังความดันเข้าสู่ถังลอยตะกอน โดยนิยามอัตราส่วนวอเตอร์ ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนวีอาร์ (\%)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำจากถังความดัน} \times 100}{\text{ปริมาตรสารแขวนลอย}} \quad (3-2)$$

ญ) รอจนฟองอากาศฟองสุดท้ายลอยพ้นความสูงของน้ำ 500 มิลลิเมตร จากนั้นเปิดวาล์วจากด้านล่างถังลอยตะกอน เพื่อนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการลอยตะกอนมาวิเคราะห์ความขุ่น

ฎ) ทำความสะอาดถังลอยตะกอน

ฏ) ทำการทดลอง 20 การทดลอง ตามสภาวะของแต่ละการทดลองตาม

ตารางที่ 3-4

จ) บันทึกผลการทดลองและคำนวณหาประสิทธิภาพ ในการกำจัดความขุ่นในแต่ละการทดลอง ดังสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น(\%)} = \frac{\text{ความขุ่นก่อนลอยตะกอน} - \text{ความขุ่นหลังลอยตะกอน}}{\text{ความขุ่นก่อนลอยตะกอน}} \times 100 \quad (3-3)$$

ท) นำข้อมูลไปคำนวณและวิเคราะห์ผลโดยวิธีการทางสถิติ

ฑ) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์สัมประสิทธิ์

ในแบบจำลอง

ณ) ทำนายผลตอบจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ และตรวจสอบ

ความถูกต้องของแบบจำลอง

ด) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้ศักย์ซีต้าเป็นค่าที่แสดงถึงเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์

ด) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ ของชุดอุปกรณ์ลอยตะกอน

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ลอยตะกอน

เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น เป็นการคำนวณที่ยังไม่ได้หักผลของการเจือจางสารแขวนลอยด้วยน้ำจากถังความดัน จึงต้องคำนวณผลของการเจือจางของน้ำจากถังความดันเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ลอยตะกอน ให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยที่ประสิทธิภาพที่น่ามาคิดได้จากการคำนวณค่าความขุ่นที่เปลี่ยนไป และหักผลของการเจือจางสารแขวนลอยด้วยน้ำจากถังความดัน โดยกำหนดให้ที่เวลาเริ่มต้นคือ เวลาที่น้ำจากถังความดันเข้าถึงลอยตะกอนครบตามจำนวนเปอร์เซ็นต์วีอาร์ และที่เวลาในการเก็บตัวอย่างคือ เวลาหลังจากทำการลอยตะกอนจนอากาศฟองสุดท้ายลอยพ้นความสูงของน้ำ 500 มิลลิเมตร

$$\text{ประสิทธิภาพ(\%)} = \frac{[(y_i \times V_i) + (y_R \times V_R)] - [(y_f \times V_f) + (y_p \times V_p)]}{(y_i \times V_i) + (y_R \times V_R)} \times 100 \quad (3-4)$$

โดยที่	y_i	คือ	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง (เอ็นทียู)
	y_f	คือ	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่างหลังทดสอบ (เอ็นทียู)
	y_R	คือ	ค่าความขุ่นของน้ำจากถังความดัน (เอ็นทียู)
	y_p	คือ	ค่าความขุ่นของตะกอนที่ลอยขึ้นด้านบน (เอ็นทียู)
	V_i	คือ	ปริมาตรน้ำตัวอย่างเริ่มต้น (ลิตร)
	V_f	คือ	ปริมาตรน้ำตัวอย่างหลังทดสอบ (ลิตร)
	V_R	คือ	ปริมาตรน้ำจากถังความดันที่เข้าสู่ถังลอยตะกอน (ลิตร)
	V_p	คือ	ปริมาตรน้ำที่ติดไปกับตะกอนที่ลอยขึ้นข้างบน (ลิตร)

เนื่องจากน้ำในถังความดันที่ใช้เป็นน้ำประปา ซึ่งค่าความขุ่นมีค่าน้อยมาก (y_R เข้าใกล้ศูนย์) และปริมาตรของน้ำที่ติดไปกับตะกอน ที่ลอยขึ้นด้านบน มีค่าน้อยมาก (V_p มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ V_f จึงสามารถละทิ้งได้) ดังนั้นสมการที่ 3-4 จึงลดรูปเป็น

$$\text{ประสิทธิภาพ (\%)} = \frac{(y_i \times V_i) - (y_f \times V_f)}{(y_i \times V_i)} \times 100 \quad (3-5)$$

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์การทดลอง

4.1 ปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ (Ozone dose) จากเครื่องผลิตโอโซน พบว่ามีค่าระหว่าง 22.8-27.6 มิลลิกรัม/ชั่วโมง โดยทำการวิเคราะห์ก่อนทำการทดลองเป็นจำนวน 40 ครั้ง ซึ่งปริมาณโอโซนที่ผลิตได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.19 มิลลิกรัม/ชั่วโมง

4.2 คุณภาพน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจาก การนำวัตถุดิบจากโรงงาน อินเตอร์อิง มาละลายน้ำ ในงานวิจัยได้เก็บตัวอย่างน้ำเสีย ตั้งแต่วันที่ 10 พ.ย. 2547 ถึงวันที่ 15 ธ.ค. 2547 เป็นจำนวน 6 ครั้ง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียหลังตกตะกอนด้วยสารเฟอร์ริคัลเฟต ณ ตำแหน่ง บ่อดกตะกอนเคมี จากนั้นนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ ข-1

4.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวดูดซับ

4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสี

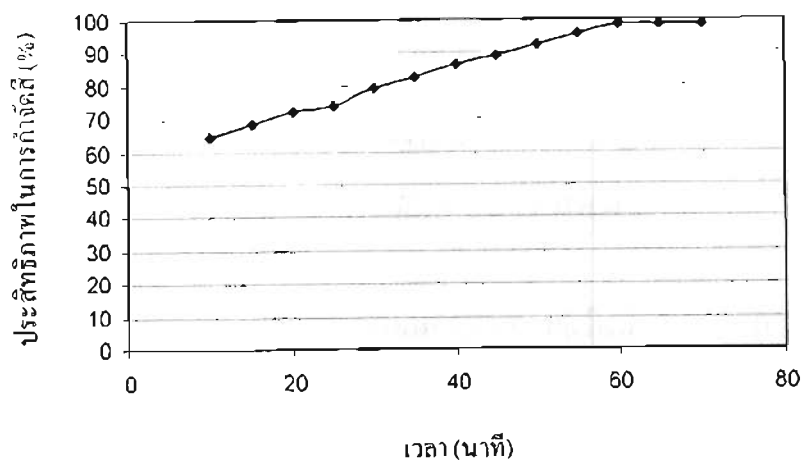
4.3.1.1 การกำหนดขอบเขตในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสี

ก่อนการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสี จะต้องทำการทดลอง เพื่อหาขอบเขตของเวลาในการโอโซนขึ้น ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-1

จากภาพที่ 4-1 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มแต่ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีจะเริ่มคงที่ที่เวลาในการโอโซนขึ้น 60 นาที ดังนั้นขอบเขตของเวลาในการ โอโซนขึ้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลองจะอยู่ระหว่าง 10-60 นาที และในการกำหนดขอบเขต ภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียสังเคราะห์ จะใช้ค่าซีโอดีเฉลี่ยหลังตกตะกอนของน้ำเสียจากโรงงาน (ประมาณ 1300 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นค่ากลางในการออกแบบการทดลอง ดังนั้นในการออกแบบ การทดลองจะได้ขอบเขตของภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ระหว่าง 650-1,950 มิลลิกรัม/ลิตร

4.3.1.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดสี

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีตามที่ได้ออกแบบ การทดลองในตารางที่ 3-2 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เวลาในการโอโซนชั้นต่างๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,940 มิลลิกรัม/ลิตร และพีเอช เท่ากับ 4.3

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยมีระดับนัยสำคัญที่ 0.05

The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for %color removal						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	77.945	1.624	48.005	0.000		
organic	-6.675	1.077	-6.196	0.000		
pH	2.901	1.077	2.693	0.023		
Time	6.966	1.077	6.467	0.000		
organic *organic	2.986	1.049	2.848	0.017		
pH*pH	0.713	1.049	0.680	0.512		
Time*Time	-0.517	1.049	-0.493	0.632		
organic *pH	-2.276	1.408	-1.617	0.137		
organic *Time	2.681	1.408	1.905	0.086		
pH*Time	-0.261	1.408	-0.186	0.856		
S = 3.981 R-Sq = 91.1% R-Sq(adj) = 83.1%						
Analysis of Variance for %color removal						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1627.48	1627.48	180.831	11.41	0.000
Linear	3	1386.28	1386.28	462.093	29.16	0.000
Square	3	141.69	141.69	47.231	2.98	0.083
Interaction	3	99.51	99.51	33.170	2.09	0.165
Residual Error	10	158.49	158.49	15.849		
Lack-of-Fit	5	157.73	157.73	31.547	207.89	0.000
Pure Error	5	0.76	0.76	0.152		
Total	19	1785.97				

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

The analysis was done using coded units.	
Estimated Regression Coefficients for %color removal using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	109.443
organic	-0.0682526
pH	2.93289
Time	0.0775388
organic *organic	0.0000199925
pH*pH	0.126052
Time*Time	-0.00234106
organic *pH	-0.00247623
organic *Time	0.000466690
pH*Time	-0.00738927

จากตารางที่ 4-1 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ดังนี้

1. ผลจากปัจจัยทั้งสามปัจจัย ได้แก่ ภาวะสารอินทรีย์ ค่าพีเอช และเวลา มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่าพีของปัจจัยทั้งสามมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ โดยมีสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สำหรับตัวแปรภาวะสารอินทรีย์เป็นลบ หมายความว่า ถ้ากำหนดปัจจัยอื่นๆ คงที่ การเพิ่มภาวะสารอินทรีย์จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรพีเอชและเวลา มีค่าเป็นบวก หมายความว่า ถ้ากำหนดปัจจัยอื่นๆ คงที่ การเพิ่มพีเอชและเวลา จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

2. อิทธิพลหลักในอันดับที่สองที่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ ภาวะสารอินทรีย์ เนื่องจากค่าพีของ Organic * Organic มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างภาวะสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการกำจัดสีเป็นไปตามสันโค้ง แต่ค่าพีเอชและเวลามีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการกำจัดสีเป็นเส้นตรง

3. อิทธิพลรวมของปัจจัยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่าพีของอิทธิพลรวมของปัจจัยมากกว่าระดับนัยสำคัญ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของภาวะสารอินทรีย์ ค่าพีเอช และเวลา ไม่มีผลต่อกัน

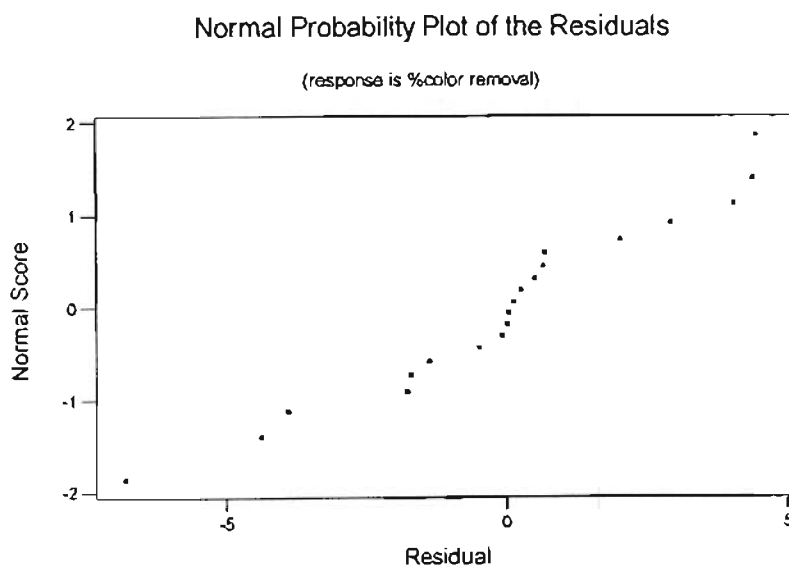
4. สำหรับแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป (Full Quadratic Model) ซึ่งให้ค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.91 แสดงดังสมการ

$$Y = 109.443 - 0.0638X_1 + 2.9329X_2 + 0.0775X_3 + 0.00002X_1^2 + 0.1260X_2^2 - 0.0023X_3^2 - 0.0024X_1X_2 + 0.0004X_1X_3 - 0.0073X_2X_3 \quad (4-1)$$

โดยที่ Y คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสี (%)
 X_1 คือ ภาระสารอินทรีย์ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 X_2 คือ พีเอช
 X_3 คือ เวลาในการโอโซนชัน (นาที)

5. ตารางที่ 4-2 แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายตามสมการและจากผลการทดสอบแล็กออฟฟิต (Lack of Fit) พบว่า แบบจำลองการถดถอยที่ได้ยังไม่สามารถฟิตข้อมูลได้ดีเพียงพอ เนื่องจากค่าพีของแล็กออฟฟิต มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

6. กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้าง ของแบบจำลองของประสิทธิภาพในการกำจัดสี แสดงดังภาพที่ 4-2 ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่าแบบจำลองนี้มีส่วนตกค้างกระจายแบบปกติเป็นไปตามข้อสมมุติฐานทางสถิติ



ภาพที่ 4-2 กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้างของแบบจำลองของประสิทธิภาพในการกำจัดสี

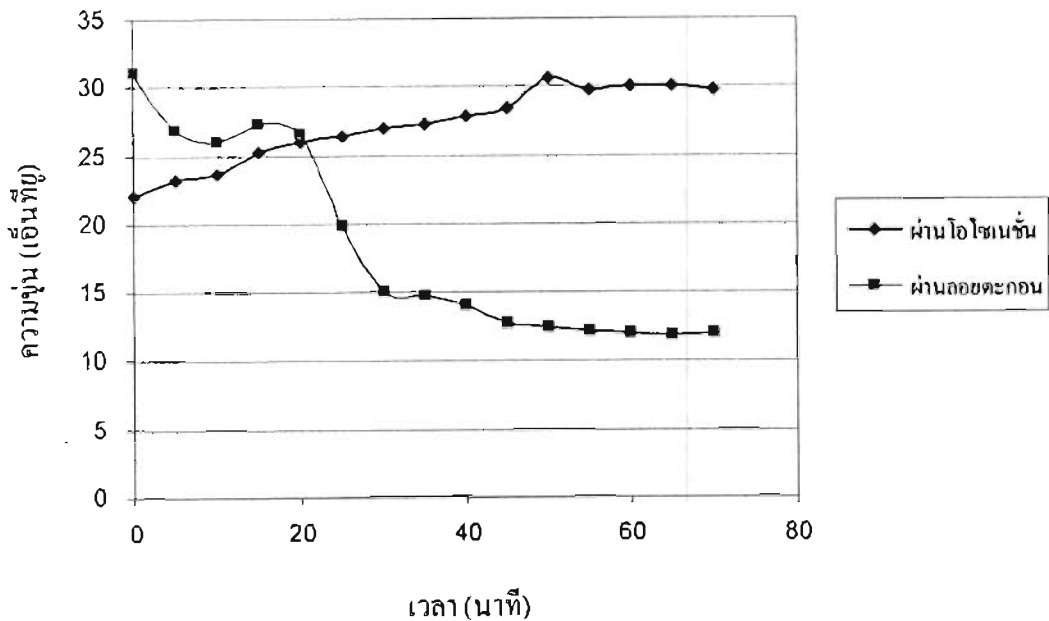
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดสี มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Konsowa [33] และ Ensar และคณะ [42] ซึ่งพบว่า โอโซนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้เป็นอย่างดี โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช และจะลดลงเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ และจากการศึกษาของ Chalor Jarusuttirak [36] พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4-2 การเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายของแบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพในการกำจัดสี

ลำดับ	ประสิทธิภาพกำจัดสีที่ได้จากการทดลอง (%)	ประสิทธิภาพกำจัดสีที่ได้จากการทำนาย (%)	ค่าความแตกต่าง (%)
1	78.220	77.945	0.275
2	71.180	75.082	-3.902
3	89.630	88.956	0.674
4	91.140	88.198	2.942
5	77.480	77.945	-0.465
6	78.100	77.945	0.155
7	85.420	87.171	-1.751
8	70.790	75.165	-4.375
9	68.320	63.918	4.402
10	77.890	77.945	-0.055
11	70.160	65.691	4.469
12	84.900	84.842	0.058
13	78.660	77.945	0.715
14	83.110	84.463	-1.353
15	77.980	77.945	0.035
16	57.980	64.766	-6.786
17	82.150	78.079	4.071
18	98.150	97.618	0.532
19	95.320	97.004	-1.684
20	85.780	83.736	2.044

4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

4.3.2.1 การหาขอบเขตในการทดลองส่วนเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นก่อนการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น จะต้องทำการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตของตัวแปรอิสระ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-3 และภาพที่ 4-5

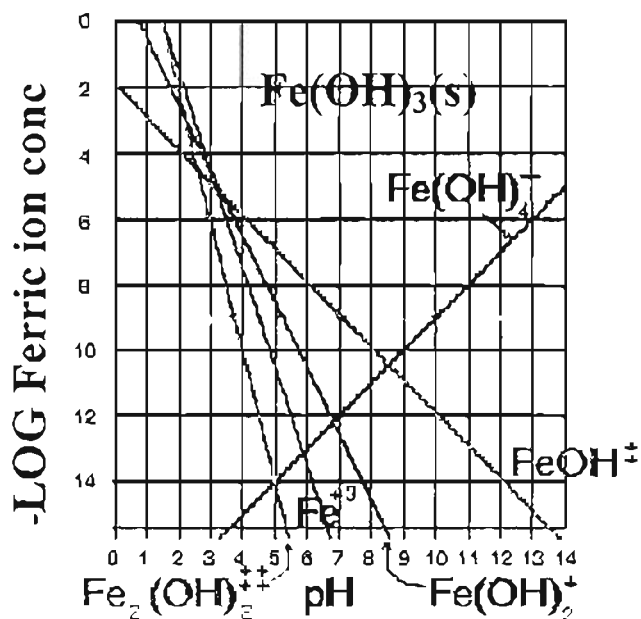


ภาพที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาในการโอโซนชั้น ที่ซีโอดี เท่ากับ 1.960 มิลลิกรัม/ลิตร ความขุ่น เท่ากับ 22 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.2 ทดลองที่ อัตราส่วนวอเตอร์ เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์

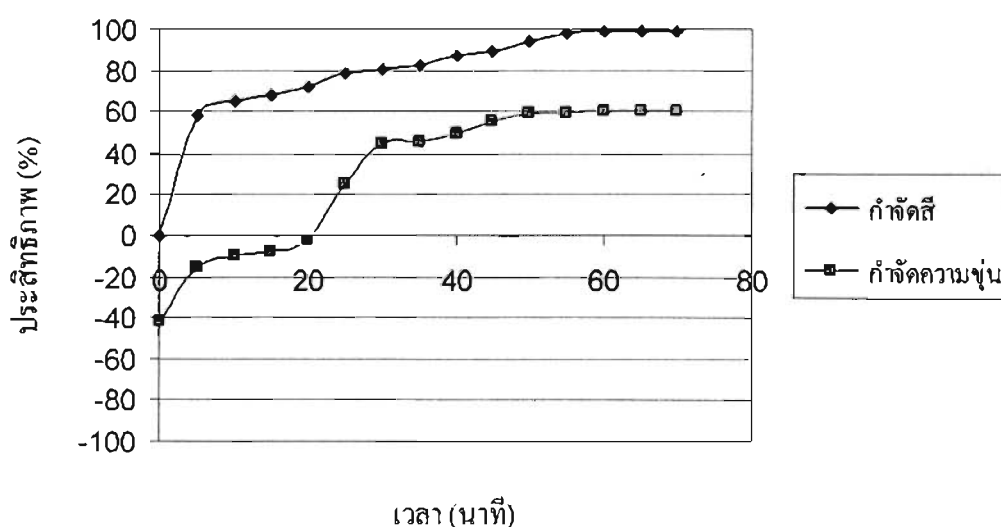
จากภาพที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ ผ่านกระบวนการโอโซนชั้น ความขุ่นจะเพิ่มขึ้นตามเวลา อาจเป็นเพราะโอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์เหล็กที่ละลายอยู่ในรูปเฟอร์รัส (Ferrous, Fe^{2+}) ไปเป็นเฟอร์ริก (ferric, Fe^{3+}) ซึ่งจะถูกไฮดรอกไซด์ไปเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide, $Fe(OH)_3$) และตกตะกอนออกจากสารละลาย [1] ทำให้อนุภาคแขวนลอยอยู่ในน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของความขุ่นที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับภาพที่ 4-4 พบว่า ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 4.2 และความเข้มข้นของเฟอร์ริกไอออน เท่ากับ 0.076 โมล/ลิตร เฟอร์ริกไอออนจะอยู่ในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์

หลังจากนั้นนำน้ำที่ผ่านกระบวนการโอโซนชั้นไปลอยตะกอน ที่อัตราส่วนวอเตอร์ คงที่ เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ พบว่า กราฟเส้นนี้สามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ที่เวลาในการโอโซนชั้น ระหว่าง 0-20 นาที ความขุ่นหลังผ่านการลอยตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากหลังการผ่านกระบวนการโอโซนชั้น และส่วนที่ 2 ที่เวลาในการโอโซนชั้นมากกว่า 20 นาที ความขุ่นหลังผ่านการลอยตะกอน จะลดลงจากหลังการผ่านกระบวนการโอโซนชั้น และจากภาพที่ 4-5 พบว่า ที่เวลาในการโอโซนชั้นตั้งแต่ 25 นาทีขึ้นไป ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นหลังการลอยตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการโอโซนชั้น เนื่องจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์เหล็กในรูปสารละลาย (Soluble Form) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (Insoluble Form) ทำให้เกิดเป็นอนุภาคแขวนลอยมากขึ้น โอโซนยังสามารถสร้างตะกอนได้เป็นอย่างดี โดยการเข้าไปทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้เกิดการรวมตัว

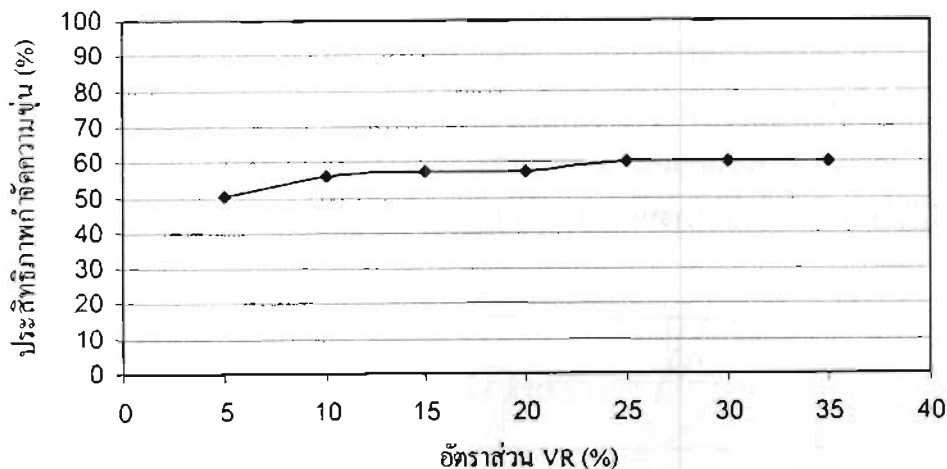
เป็นตะกอน ดังนั้นเมื่อเวลาในการโอโซนเนชั่นเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูงขึ้นและเกิดตะกอนมากขึ้น โอกาสที่ฟองอากาศมาสัมผัสกับสารแขวนลอยย่อมมีมากขึ้นด้วย ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจะเริ่มคงที่ที่เวลา 60 นาที ดังนั้นขอบเขตของเวลาในการโอโซนเนชั่นที่ใช้ในการออกแบบการทดลองอยู่ระหว่าง 25-60 นาที



ภาพที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและความเข้มข้นของเฟอริกไอออน [43]



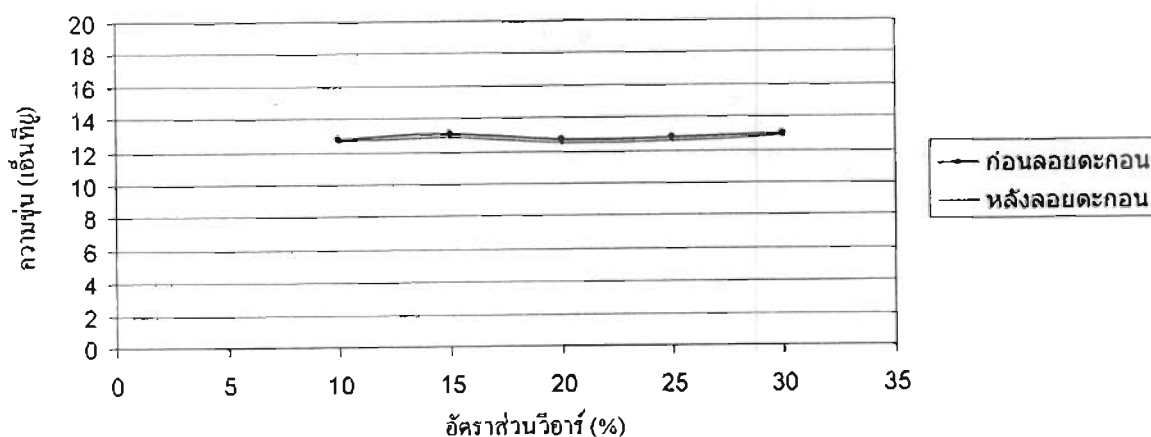
ภาพที่ 4-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและความขุ่นที่เวลาในการโอโซนชั้นต่างๆ
ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความขุ่น เท่ากับ 22 เอ็นทียู พีเอช
เท่ากับ 4.2 ทดลองที่อัตราส่วนวอเตอร์ เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นที่อัตราส่วนวีอาร์ต่างๆ ที่ซีโอดีเท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความชื้นเริ่มต้น เท่ากับ 22 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.2 ทดลองที่เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 60 นาที

จากภาพที่ 4-6 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนวีอาร์ และประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่ที่อัตราส่วนวีอาร์เท่ากับ 30 เปอร์เซนต์ ดังนั้นขอบเขตของอัตราส่วนวีอาร์ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองอยู่ระหว่าง 5-30 เปอร์เซนต์

ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น ถ้าภาระสารอินทรีย์มีค่าซีโอดีเท่ากับค่าซีโอดีเฉลี่ยหลังตกตะกอนของน้ำเสียจากโรงงาน (ประมาณ 1,300 มิลลิกรัม/ลิตร) ผลของประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นที่อัตราส่วนวีอาร์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอัตราส่วนวีอาร์ ที่ซีโอดีเริ่มต้น เท่ากับ 1,305 มิลลิกรัม/ลิตร ความชื้นเริ่มต้น เท่ากับ 11.6 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.1 ทดลองที่เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 30 นาที

จากภาพที่ 4-7 พบว่า เมื่อภาระสารอินทรีย์มีค่าซีโอดีเท่ากับ 1,305 มิลลิกรัม/ลิตร จะไม่แสดงความแตกต่างของความขุ่นก่อนและหลังการลอยตะกอนอย่างชัดเจน ดังนั้นในการทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น จึงเลือกใช้ภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดีเท่ากับ 1,965 ซึ่งเป็นค่าซีโอดีของน้ำเสียหลังตกตะกอนของโรงงานที่มีค่าตะกอนแขวนลอยเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานที่กำหนดไว้ คือต้องไม่เกิน 150 มิลลิกรัม/ลิตร [44]

4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ตามที่ได้ออกแบบการทดลองใน ตารางที่ 3-4 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางสถิติ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยมีระดับนัยสำคัญที่ 0.05

The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for %turbid				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	58.7727	0.4124	142.527	0.000
VR	4.9365	0.2736	18.043	0.000
pH	1.7559	0.2736	6.418	0.000
Time	2.5256	0.2736	9.231	0.000
VR*VR	-0.0223	0.2663	-0.084	0.935
pH*pH	-0.7753	0.2663	-2.911	0.016
Time*Time	-0.3581	0.2663	-1.345	0.208
VR*pH	-0.5937	0.3575	-1.661	0.128
VR*Time	-0.7337	0.3575	-2.053	0.067
pH*Time	-0.3512	0.3575	-0.983	0.349
S = 1.011 R-Sq = 97.9% R-Sq(adj) = 96.0%				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	58.7727	0.4124	142.527	0.000
VR	4.9365	0.2736	18.043	0.000
pH	1.7559	0.2736	6.418	0.000
Time	2.5256	0.2736	9.231	0.000
VR*VR	-0.0223	0.2663	-0.084	0.935
pH*pH	-0.7753	0.2663	-2.911	0.016
Time*Time	-0.3581	0.2663	-1.345	0.208
VR*pH	-0.5937	0.3575	-1.661	0.128
VR*Time	-0.7337	0.3575	-2.053	0.067
pH*Time	-0.3512	0.3575	-0.983	0.349
S = 1.011 R-Sq = 97.9% R-Sq(adj) = 96.0%				

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

The analysis was done using coded units.						
Analysis of Variance for %turbid removal						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	480.045	480.045	53.338	52.18	0.000
Linear	3	462.023	462.023	154.008	150.65	0.000
Square	3	9.908	9.908	3.303	3.23	0.069
Interaction	3	8.114	8.114	2.705	2.65	0.106
Residual Error	10	10.223	10.223	1.022		
Lack-of-Fit	5	8.334	8.334	1.667	4.41	0.065
Pure Error	5	1.889	1.889	0.378		
Total	19	490.268				
Estimated Regression Coefficients for %turbid removal using data in uncoded units						
Term	Coef					
Constant	3.45927					
VR	1.31661					
pH	3.84812					
Time	0.789248					
VR*VR	-0.000403114					
pH*pH	-0.137062					
Time*Time	-0.00330771					
VR*pH	-0.0335876					
VR*Time	-0.00948735					
pH*Time	-0.0141926					

จากตารางที่ 4-3 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ดังนี้

1. อิทธิพลหลักที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเกิดขึ้นทั้งสามปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนวอเตอร์ พีเอช และเวลาในการโอโซนเนชั่น เนื่องจากค่าพีของปัจจัยทั้งสามมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับตัวแปรทั้งสามเป็นบวก หมายความว่า หากกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวอเตอร์ พีเอช และเวลา จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
2. อิทธิพลหลักในอันดับที่สองที่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ พีเอช เนื่องจากค่าพีของ $pH * pH$ มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเป็นไปตามเส้นโค้ง แต่อัตราส่วนวอเตอร์ และเวลาในการโอโซนเนชั่น มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเป็นเส้นตรง
3. อิทธิพลร่วมของปัจจัยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่าพีของอิทธิพลร่วมของปัจจัยมากกว่าระดับนัยสำคัญ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนวอเตอร์ พีเอช และเวลาในการโอโซนเนชั่น ไม่มีผลต่อกัน
4. สำหรับแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป (Full Quadratic Model) ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.979 แสดงดังสมการ

$$Y = 3.45927 + 1.31661X_1 + 3.84812X_2 + 0.789248X_3 - 0.000403114X_1^2 - 0.137062X_2^2 - 0.00330771X_3^2 - 0.0335876X_1X_2 + 0.00948735X_1X_3 - 0.0141926X_2X_3$$

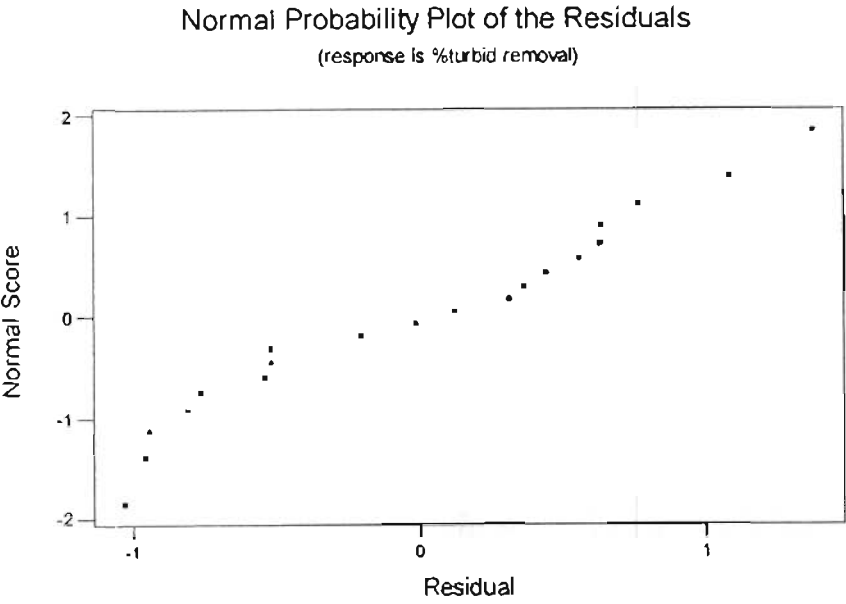
(4-2)

โดยที่ Y คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น
 X_1 คือ อัตราส่วนวีอาร์ (%)
 X_2 คือ พีเอช
 X_3 คือ เวลาในการโอโซนเนชั่น (นาที)

5. ตารางที่ 4-4 แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลอง และการทำนายตามสมการและจากผลการทดสอบแล็กออกฟิต (Lack of Fit) พบว่า แบบจำลองการถดถอยที่ได้สามารถฟิตข้อมูลได้ดีเพียงพอ เนื่องจากค่าพีของแล็กออกฟิต มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ

6. กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้าง ของแบบจำลองของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น แสดงดังภาพที่ 4-8 ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่า แบบจำลองนี้มีส่วนตกค้างกระจายแบบปกติเป็นไปตามข้อสมมุติฐานทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Shamrani และคณะ [45] ซึ่งพบว่า ปริมาณของฟองอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น โดยฟองอากาศที่มากขึ้นจะสามารถลอยอนุภาคแขวนลอยขึ้นไปสู่ผิวน้ำได้มากขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น งานวิจัยนี้แสดงปริมาณของฟองอากาศในเทอมของอัตราส่วนวีอาร์ โดยการเพิ่มอัตราส่วนวีอาร์จะทำให้เกิดฟองอากาศมากขึ้น นอกจากนั้นพบว่า การทำให้อนุภาคแขวนลอยรวมตัวกัน (Flocculation) ก่อนการลอยตะกอนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ซึ่งการทำให้ระบบคอลลอยด์มีค่าศักย์ซีต้าเท่ากับศูนย์ จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีค่ามากที่สุด จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การเพิ่มพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่นจนถึงสภาวะที่เหมาะสม จะทำให้ค่าศักย์ซีดามีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด



ภาพที่ 4-8 กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้างของแบบจำลองของประสิทธิภาพ ในการกำจัดความขุ่น

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายของแบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น

ลำดับ	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นที่ได้จากการทดลอง (%)	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นที่ได้จากการทำนาย (%)	ค่าความแตกต่าง (%)
1	66.49	67.012	-0.522
2	58.23	58.773	-0.543
3	52.91	53.941	-1.031
4	57.83	58.773	-0.943
5	51.49	50.408	1.082
6	58.76	58.773	-0.013
7	47.09	46.72	0.37
8	56.98	57.938	-0.958
9	63.38	62.007	1.373
10	53.42	53.627	-0.207
11	60.3	59.533	0.767

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

ลำดับ	ประสิทธิภาพกำจัด ความขุ่นที่ได้จากการ ทดลอง (%)	ประสิทธิภาพกำจัด ความขุ่นที่ได้จากการ ทำนาย (%)	ค่าความแตกต่าง (%)
12	62.91	62.275	0.635
13	51.6	52.122	-0.522
14	59.22	58.773	0.447
15	64.39	65.156	-0.766
16	59.09	58.773	0.317
17	59.41	58.773	0.637
18	59.81	59.248	0.562
19	63.66	63.534	0.126
20	52.7	53.512	-0.812

4.3.3 คักย์ซีต้า

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าคักย์ซีต้า แสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าคักย์ซีต้า

The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for zetapotential				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.013	0.2508	8.029	0.000
pH	-4.391	0.1960	-22.405	0.000
Time	-1.355	0.1960	-6.911	0.000
pH*pH	-1.398	0.1899	-7.364	0.000
Time*Time	-0.408	0.1899	-2.150	0.050
pH*Time	-0.437	0.2561	-1.708	0.110
S = 0.7243 R-Sq = 97.8% R-Sq(adj) = 97.0%				

ตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าศักย์ซีต้า

The analysis was done using coded units.						
Analysis of Variance for zetapotential						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	319.567	319.567	63.913	121.82	0.000
Linear	2	288.422	288.422	144.211	274.87	0.000
Square	2	29.614	29.614	14.807	28.22	0.000
Interaction	1	1.531	1.531	1.531	2.92	0.110
Residual Error	14	7.345	7.345	0.525		
Lack-of-Fit	3	7.091	7.091	2.364	102.47	0.000
Pure Error	11	0.254	0.254	0.023		
Total	19	326.912				
Estimated Regression Coefficients for zetapotential using data in uncoded units						
Term	Coef					
Constant	-3.70670					
pH	2.36497					
Time	0.313940					
pH*pH	-0.247144					
Time*Time	-0.00376916					
pH*Time	-0.0176777					

จากตารางที่ 4-5 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ดังนี้

1. อิทธิพลหลักที่มีต่อค่าศักย์ซีต้า ได้แก่ พีเอช และเวลาในการโอโซเนชัน เนื่องจากค่าพี ของปัจจัยทั้งสองมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับตัวแปรทั้งสามเป็นบวก หมายความว่า หากกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ เมื่อเพิ่มพีเอชและเวลาในการโอโซเนชัน จะทำให้ค่าศักย์ซีตามีแนวโน้มเป็นบวกน้อยลงและมีความเป็นลบมากขึ้น
2. อิทธิพลหลักในอันดับที่สองที่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ การกระสารอินทรีย์ เนื่องจากค่าพีของ $\text{pH} \cdot \text{pH}$ มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและค่าศักย์ซีต้าเป็นไปตามสันโค้ง แต่เวลาในการโอโซเนชันมีความสัมพันธ์กับค่าศักย์ซีต้าเป็นเส้นตรง
3. อิทธิพลร่วมของปัจจัยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่าพีของอิทธิพลร่วมของปัจจัยมากกว่าระดับนัยสำคัญ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของพีเอชและเวลาในการโอโซเนชันไม่มีผลต่อกัน
4. สำหรับแบบจำลองการถดถอย ซึ่งให้ค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.978 แสดงดังสมการ

$$Y = -3.70670 + 2.36497X_1 + 0.313940X_2 - 0.247144X_1^2 - 0.00376916X_2^2 - 0.0176777X_1X_2$$

(4-3)

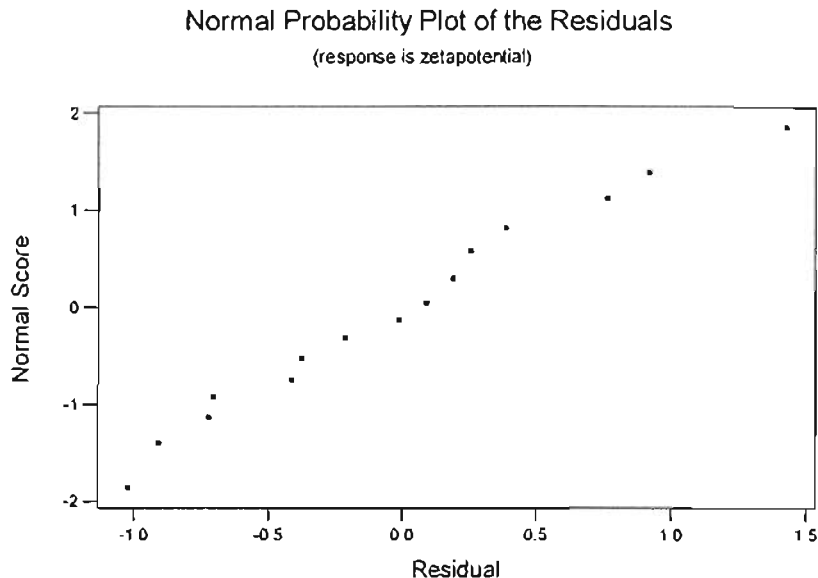
โดยที่ Y คือ ค่าศักย์ซีต้า

X_1 คือ พีเอช

X_2 คือ เวลาในการโอโซนเนชั่น (นาที)

5. ตารางที่ 4-6 แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลอง และการทำนายตามสมการและจากผลการทดสอบแล็กออกฟิต (Lack of Fit) พบว่า แบบจำลองการถดถอยที่ได้ยังไม่สามารถฟิตข้อมูลได้ดีเพียงพอ เนื่องจากค่าพีของแล็กออกฟิต มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

6. กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้างของแบบจำลองของศักย์ซีต้า แสดงดังภาพที่ 4-9 ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่า แบบจำลองนี้มีส่วนตกค้างกระจายแบบปกติเป็นไปตามข้อสมมุติฐานทางสถิติ



ภาพที่ 4-9 กราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้างของแบบจำลองของศักย์ซีต้า

ตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าผลตอบแทนที่ได้จากการทดลองและการทำนายของแบบจำลองการถดถอยของค่าศักย์ชีต้า

ลำดับ	ค่าศักย์ชีต้าที่ได้จากการทดลอง	ค่าศักย์ชีต้าที่ได้จากการทำนาย	ค่าความแตกต่าง
1	2.000	2.013	-0.013
2	2.400	2.013	0.387
3	3.300	3.681	-0.381
4	2.100	2.013	0.087
5	2.200	2.013	0.187
6	2.000	2.013	-0.013
7	5.300	5.516	-0.216
8	-6.700	-5.976	-0.724
9	-0.500	-1.491	0.919
10	5.700	5.444	0.256
11	-7.900	-9.326	1.426
12	-3.300	-2.392	-0.908
13	-3.100	-2.392	-0.708
14	2.200	2.013	0.187
15	-7.000	-5.976	-1.024
16	2.200	2.013	0.187
17	2.400	2.013	0.387
18	5.100	5.516	-0.416
19	3.300	3.681	-0.381
20	3.900	3.137	0.763

4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสม

4.4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่น

ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่น จะใช้แบบจำลองการถดถอย ตามสมการที่ 4-1 โดยกำหนดค่าเป้าหมายของประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ

100 เปอร์เซ็นต์ จากการคำนวณทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมหลายค่า แต่สภาวะที่เลือกให้เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่ภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช เท่ากับ 8.7 และเวลาในการโอโซนเนชั่นเท่ากับ 20 นาที เนื่องจากเป็นสภาวะที่ใช้เวลาในการโอโซนเนชั่นน้อยที่สุดที่ค่าพีเอชหลังการปรับไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานที่กำหนดไว้ว่า ค่าพีเอชต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 5.5-9 [44] จากนั้นได้ทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ (ภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 665 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช เท่ากับ 8.8 และ เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 20 นาที) ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้มีความแตกต่างจากผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองเพียง 1.5 เปอร์เซ็นต์

4.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับการลอยตะกอน

ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่น ร่วมกับการลอยตะกอน จะใช้แบบจำลองการถดถอย ตามสมการที่ 4-2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น และตามสมการที่ 4-3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เพื่อให้ได้จุดไอโซอิเล็กทริก คือจุดที่ศักย์ซีต้า เท่ากับ 0 มิลลิโวลล์ จากการคำนวณทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ แสดงดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับการลอยตะกอน

สภาวะที่เหมาะสม ผลตอบ	อัตราส่วนวี อาร์ (%)	ค่าพีเอช	เวลา (นาที)	ค่าที่ได้จาก การทำนาย
กำจัดความขุ่น(%)	30	7.3	60	68
ศักย์ซีต้า (มิลลิโวลล์)	-	6.8	56	0

หลังจากนั้นทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ดังกล่าว แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 การเปรียบเทียบค่าผลตอบจากการวิเคราะห์ทางสถิติและผลการทดลอง

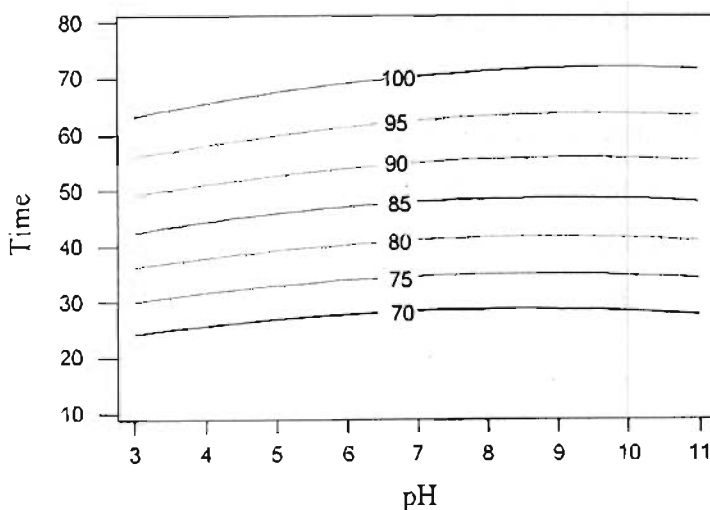
ผลตอบ	ค่าที่ได้จากการ ทดลอง	ค่าที่ได้จากการ ทำนาย	ค่าความแตกต่าง (%)
กำจัดความขุ่น(%)	67.56	68	0.64
ศักย์ซีต้า (มิลลิโวลล์)	-0.2	0	-

จากที่ได้กล่าวมาเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์ ได้แก่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสี ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น และการหาสภาวะที่ทำให้เกิดจุดไอโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นจุดที่อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันได้ดีที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ขัณฑ์ของโรงงาน คือ ที่อัตราส่วนวอเตอร์ เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ ค่าพีเอช เท่ากับ 7.3 และเวลา ในการโอโซนเนชั่น 60 นาที จากสมการการถดถอย ที่สภาวะนี้จะได้ ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ศักย์ซีดีค่า เท่ากับ 2.08 มิลลิโวลล์ และประสิทธิภาพในการกำจัด ความขุ่น เท่ากับ 68 เปอร์เซ็นต์

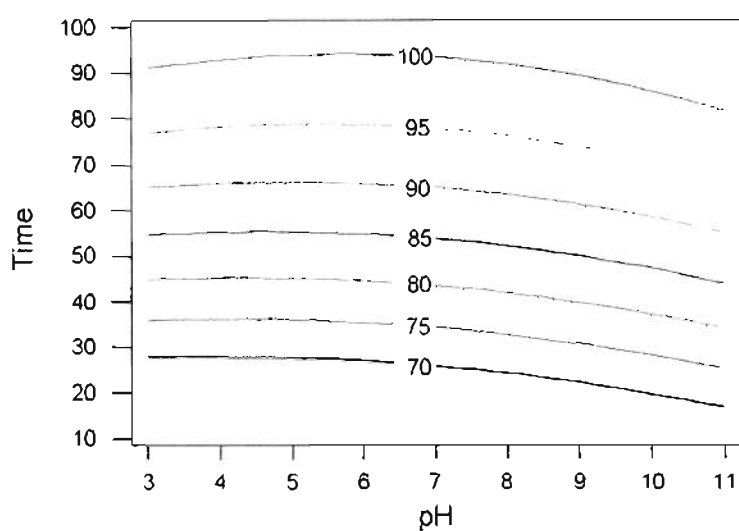
4.4.2.1 สภาวะที่เหมาะสมตามแบบจำลองที่ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้แบบจำลองการถดถอย ตามสมการที่ 4-1 เพื่อทำนายผลของ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงาน ตามสภาวะที่ภาระสารอินทรีย์มีค่าซีไอดี เท่ากับค่าซีไอดีที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำเสียหลังตกตะกอนจากโรงงาน โดยทำนายผลที่ค่าซีไอดี สูงที่สุด ค่ากลาง $((\text{ค่าสูงที่สุด} + \text{ค่าต่ำที่สุด})/2)$ และค่าต่ำที่สุด ซึ่งแสดงดังตารางที่ ข-1 ผลจาก การทำนายแสดงดังภาพที่ 4-10 ถึง ภาพที่ 4-12



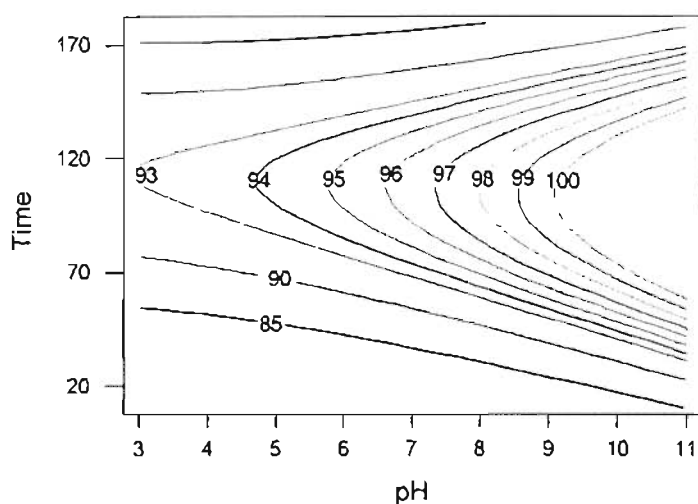
ภาพที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาระสารอินทรีย์ คงที่ที่ 1,965 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ

จากภาพที่ 4-10 พบว่า ที่ภาระสารอินทรีย์ 1,965 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าพีเอช เท่ากับ 4.8 จะใช้เวลาในการโอโซนเนชั่น 66 นาที เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาวะสารอินทรีย์คงที่ที่ 1,490 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ

จากภาพที่ 4-11 พบว่า ที่ภาวะสารอินทรีย์ 1,490 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าพีเอช เท่ากับ 5.08 จะใช้เวลาในการโอโซนเนชั่น 98 นาที เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาวะสารอินทรีย์คงที่ที่ 1,015 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ

จากภาพที่ 4-12 พบว่า ที่ภาระสารอินทรีย์ 1,015 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 5.36 ไม่สามารถกำจัดสีให้ได้ประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะนี้ได้ นอกจากการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้ได้อย่างน้อยที่สุดเป็น 9.2 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานที่กำหนดไว้ว่าค่าพีเอช ต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 5.5-9 [44] และเวลาในการโอโซนขึ้นเท่ากับ 100 นาที เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์

4.4.2.2 สภาวะที่เหมาะสมตามแบบจำลองที่ค่าพีเอช เท่ากับ 7.3

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้แบบจำลองการถดถอย ตามสมการที่ 4-1 เพื่อทำนายผลของประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงาน ตามสภาวะที่ภาระสารอินทรีย์มีค่าซีโอดีเท่ากับค่าซีโอดีที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำเสียหลังตกตะกอนจากโรงงาน โดยทำนายผลที่ค่าซีโอดี สูงที่สุด ค่ากลาง และค่าต่ำที่สุด ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 7.3 (พีเอชที่เหมาะสมของการกำจัดความขุ่น) ผลจากการทำนายแสดงดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 สภาวะที่เหมาะสมตามแบบจำลองที่ค่าพีเอช เท่ากับ 7.3

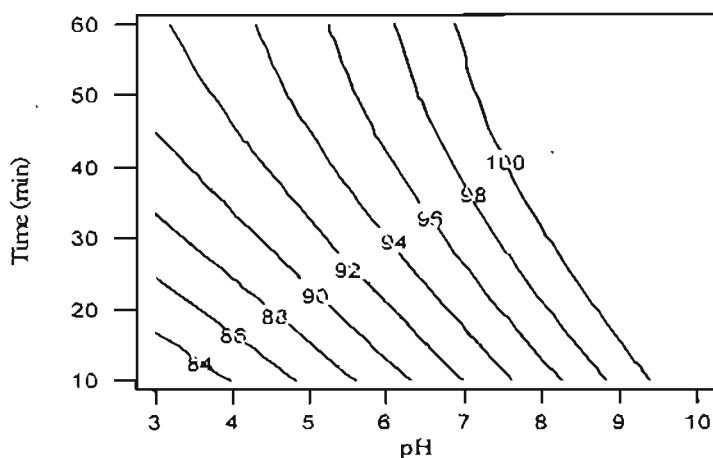
สภาวะที่	ภาระสารอินทรีย์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	เวลาโอโซนขึ้น (นาที)	ประสิทธิภาพในการ กำจัดสี (%)
1	1965	69	100
2	1490	96	100
3	1015	110	97

4.5 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและกำจัดความขุ่น

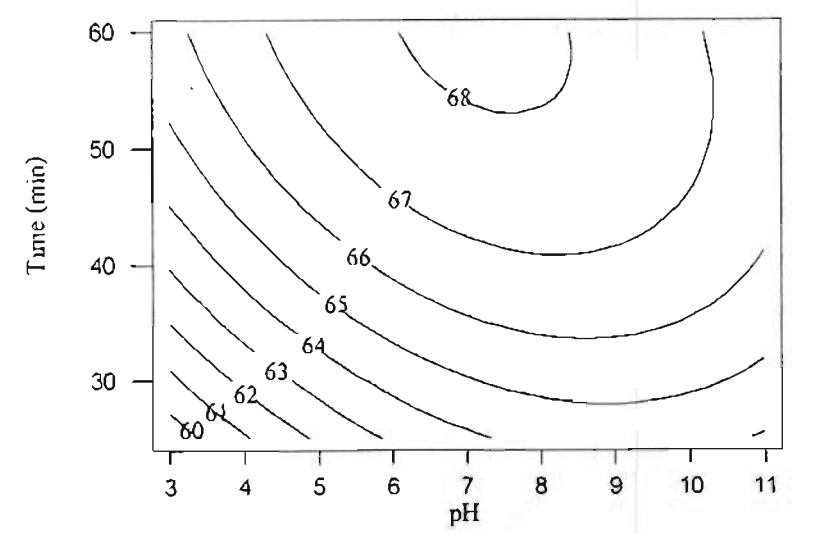
ภาพที่ 4-13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช และเวลาในการโอโซนขึ้น ที่ภาระสารอินทรีย์คงที่ที่ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีต่างๆ ซึ่งจากกราฟ จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชคงที่ค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการโอโซนขึ้น เพิ่มขึ้น และที่เวลาในการโอโซนขึ้นค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่าพีเอช นอกจากนั้นเวลาที่ใช้ในการกำจัดสีให้สมบูรณ์จะลดลงเมื่อเพิ่มค่าพีเอช

ภาพที่ 4-14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช และเวลาในการโอโซนขึ้น ที่อัตราส่วนวอเตอร์ คงที่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นต่างๆ ซึ่งจากกราฟ จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชคงที่ค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการ โอโซนขึ้นเพิ่มขึ้น และที่เวลาในการโอโซนขึ้นค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซนคือ อุณหภูมิ ด้วยยับยั้ง (Scavenger) และค่าพีเอช [20] การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชยังมีผลต่อความสามารถ ในการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ของโอโซน โดยทำให้ศักยภาพในการออกเดชันของโอโซน (Oxidation

Potential) ซึ่งมีค่าลดลงจาก 2.07 โวลต์ ที่สภาวะกรด เป็น 1.4 โวลต์ ที่สภาวะด่าง [46] และเป็นตัวกำหนดเส้นทางทำปฏิกิริยาของโอโซน โดยที่โอโซนสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งในสภาวะที่เป็นกรด โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์โดยตรง ส่วนในสภาวะที่เป็นด่างจะเกิดการสลายตัวของโอโซน ซึ่งถูกเร่งโดยตัวริเริ่ม (Initiator) เช่น ไฮดรอกไซด์ไอออน เพื่อทำให้เกิดออกซิ-แดนซ์ลำดับที่สอง (Secondary Oxidant) เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ไฮโดรไคดรอกไซด์เรดิคัล และไฮโดรเตตระออกไซด์เรดิคัล ซึ่งในกลุ่มของออกซิแดนซ์ลำดับที่สอง เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล มีออกซิเดชันสูงที่สุดคือ 2.8 โวลต์ [20] ถึงแม้ว่าบทบาทในการออกซิไดซ์ของโอโซนจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นแต่บทบาทของออกซิแดนซ์ลำดับที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น ผลจากภาพที่ 4-13 และภาพที่ 4-14 อธิบายได้ว่า ไฮดรอกไซด์ไอออนจะเป็นตัวริเริ่มให้เกิดการสลายตัวของโอโซน และเกิดกลุ่มของออกซิแดนซ์ลำดับที่สองขึ้นตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งในกลุ่มของออกซิแดนซ์ลำดับที่สองจะมีไฮดรอกซิลเรดิคัล ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดีกว่าโอโซน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการลดลงของสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช นอกจากนั้น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ทำให้ความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเป็นอนุภาคแขวนลอยมากขึ้น และการดูดซับไฮดรอกไซด์ไอออน ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ทำให้เกิดการสร้างตะกอน โดยไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าไปสะเทินประจุที่ผิวของอนุภาคให้เป็นกลาง ดังนั้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูงขึ้นและเกิดการรวมตัวของตะกอนมากขึ้น โอกาสที่ฟองอากาศมาสัมผัสกับสารแขวนลอยย่อมมีมากขึ้น ด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น [47]

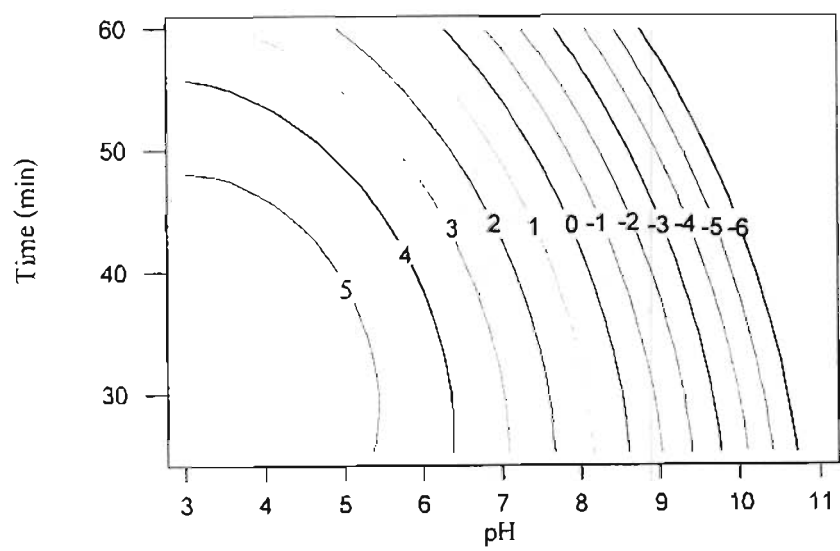


ภาพที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาระสารอินทรีย์คงที่ที่ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ



ภาพที่ 4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่อัตราส่วนวอเตอร์คองที่30 เปอร์เซนต์ ภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นต่างๆ

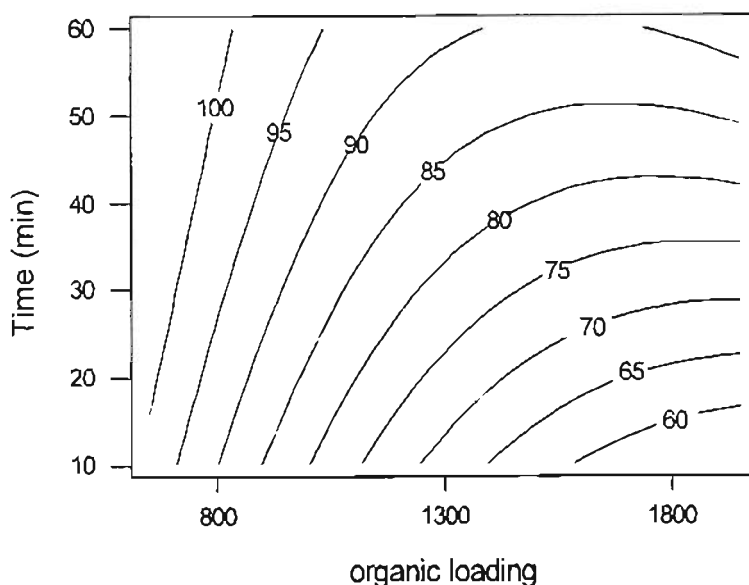
4.6 ผลของพีเอชต่อค่าศักยภาพซีดีต้า



ภาพที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น ที่ภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ศักยภาพซีดีต้าต่างๆ

จากภาพที่ 4-15 พบว่า ที่เวลาในการโอโซนเข้มข้นค่าหนึ่ง คักยชีด้าจะมีค่าเป็นบวกลดลง และมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช เป็นผลมาจากการดูดซับของไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ [31] และที่ค่าพีเอชคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อเวลาในการโอโซนเข้มข้นเพิ่มขึ้น คักยชีด้าจะมีค่าเป็นบวกลดลงและมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนและโอโซนในขั้นตอนเริ่มต้นของปฏิกิริยาทางอ้อม ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนอนแตรดิคอล ซึ่งเป็นประจุลบ [20] จากนั้นจะถูกดูดซับที่ชั้นของประจุ ถ้าอนุภาคมีคักยชีด้าเป็นบวก ประจุลบนี้จะเข้าไปสะเทินประจุบวกที่ชั้นของประจุ และเมื่อเวลาในการโอโซนเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดประจุลบถูกดูดซับที่ชั้นของประจุเพิ่มขึ้น ทำให้คักยชีด้าของอนุภาคกลายเป็นลบ แต่ถ้าอนุภาคมีคักยชีด้าเป็นลบจะทำให้มีประจุลบเพิ่มขึ้นที่ชั้นของประจุเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์ [32]

4.7 ผลของการกระสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี

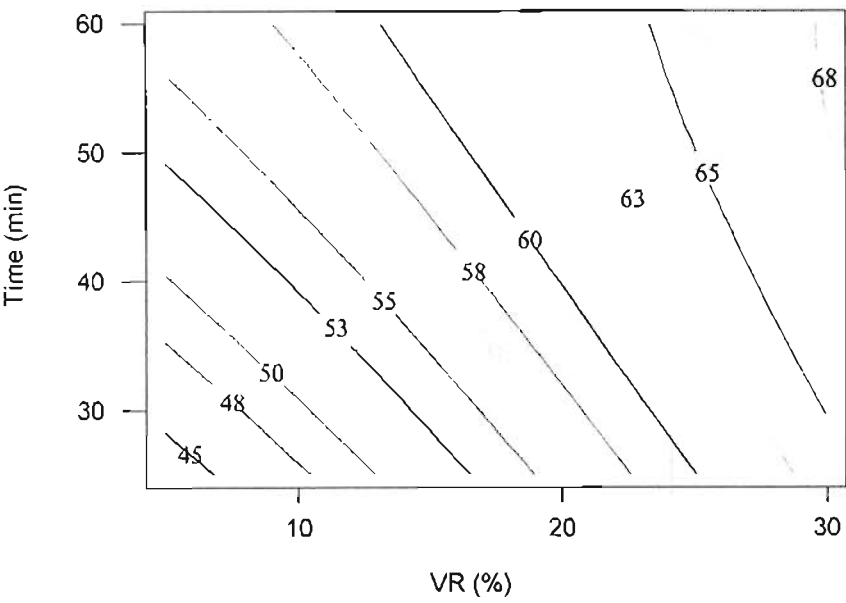


ภาพที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและเวลาในการโอโซนเข้มข้น ที่พีเอชคงที่
ที่ 8.7 ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่างๆ

จากภาพที่ 4-16 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการโอโซนเข้มข้น เนื่องจากการบำบัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น จะเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสี โดยโอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์โครโมฟอร์ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ โดยโอโซนจะเข้าไปทำลายพันธะทั้งทางตรงและทางอ้อม

ทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งไม่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ เป็นสาเหตุที่ทำให้สีของน้ำเสียลดลง

4.8 ผลของอัตราส่วนวอเตอร์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น



ภาพที่ 4-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนวอเตอร์และเวลาในการโอโซนเนชั่น ภาวะสารอินทรีย์ เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช เท่ากับ 7.3 ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นต่างๆ

จากภาพที่ 4-17 พบว่าที่เวลาในการโอโซนเนชั่นคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนวอเตอร์ เพราะเกิดฟองอากาศที่มากขึ้นลอยตะกอนขึ้นไปสู่ผิวน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดสีและความขุ่นของ น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากหมักเฟลโซ์ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ ของอนุภาคคอลลอยด์ โดยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ โดยใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติสรุปได้ดังนี้

5.1.1 กระบวนการโอโซนเนชั่นสามารถกำจัดสีได้เป็นอย่างดี ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสี คือ ภาวะสารอินทรีย์ พีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น โดยที่ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสี จะลดลงเมื่อเพิ่มภาวะสารอินทรีย์

5.1.2 สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ คือ ภาวะสารอินทรีย์ เท่ากับ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช เท่ากับ 8.7 และเวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 20 นาที จากนั้นได้ทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ (ภาวะสารอินทรีย์ เท่ากับ 665 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช เท่ากับ 8.8 และ เวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 20 นาที) ผลที่ได้ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้มีความแตกต่างจากผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองเพียง 1.5 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น คือ อัตราส่วนวิวาร์ พีเอชและ เวลาในการโอโซนเนชั่น โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วน วิวาร์ พีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น

5.1.4 สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 68 เปอร์เซ็นต์ คือ อัตราส่วนวิวาร์ เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ ค่าพีเอช เท่ากับ 7.3 และเวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 60 นาที จากนั้นได้ทำการทดลองที่สภาวะเหมาะสมที่ได้ ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพในการ กำจัดความขุ่น เท่ากับ 67.56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้ี้มีความแตกต่างจากผลการทำนาย โดยใช้แบบจำลองเพียง 0.64 เปอร์เซ็นต์ สรุปจากการทดลองได้ว่า การใช้โอโซนร่วมกับการลอยตะกอนไม่สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีเพียงพอ

5.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าศักยภาพซีต้า คือ ค่าพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น โดยเมื่อเพิ่ม ค่าพีเอชและเวลาในการโอโซนเนชั่น จะทำให้ค่าศักยภาพซีต้ามีแนวโน้มเป็นบวกน้อยลงและมีความเป็นลบมากขึ้น

5.1.6 สภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เพื่อให้ได้จุดไอโซอิเล็กทริก คือ ค่าพีเอช เท่ากับ 6.8 และเวลาในการโอโซนเนชั่น เท่ากับ 56 นาที จากนั้นได้ทำการทดลองที่สภาวะเหมาะสมที่ได้ ผลของศักย์ซีต้าที่ได้เท่ากับ -0.2 มิลลิโวลล์

5.1.7 ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสภาวะที่เหมาะสมในการทำจัดความขุ่น เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นของโรงงาน คือ ที่อัตราส่วนวอเตอร์ เท่ากับ 30 เปอร์เซนต์ ค่าพีเอช เท่ากับ 7.3 และเวลาในการโอโซนเนชั่น 60 นาที จากสมการการถดถอยที่สภาวะนี้จะได้ ประสิทธิภาพในการทำจัดสี เท่ากับ 100 เปอร์เซนต์ ศักย์ซีต้า เท่ากับ -2.08 มิลลิโวลล์ และประสิทธิภาพในการทำจัดความขุ่น เท่ากับ 68 เปอร์เซนต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าการใช้โอโซน ร่วมกับการลอยตะกอนไม่สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีเพียงพอ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำจัดความขุ่นให้ดียิ่งขึ้นดังต่อไปนี้

5.2.1 ศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนในการบำบัดที่มีต่อประสิทธิภาพในการทำจัดความขุ่น จากการศึกษาของ ชารกมล [48] พบว่า เมื่อปริมาณของโอโซนเพิ่มขึ้น ตะกอนแขวนลอยหลังจากอัดโอโซนและปล่อยให้ตกตะกอน (Suspended Solid) มีค่าลดลง เนื่องจากโอโซนทำการเปลี่ยนประจุที่ผิวของอนุภาคให้เป็นกลาง ทำให้เกิดการจับตัวของอนุภาคคอลลอยด์เป็นตะกอนที่มากขึ้นและมีขนาดใหญ่นตกตะกอนลงมา และจากการศึกษาของ Fukushi และคณะ [47] พบว่าตะกอนขนาดใหญ่จะทำให้ฟองอากาศมีโอกาสสัมผัสได้มากกว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำจัดความขุ่น

5.2.2 ศึกษาขนาดของฟองอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดความขุ่นจากการศึกษาของ Shamrani, et al. [43] พบว่า ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วในการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้ช้ากว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กอยู่ในถังลอยตะกอนนานกว่าเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างฟองอากาศและตะกอนแขวนลอย ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำจัดความขุ่น

5.2.3 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น ร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ โดยปรับค่ากลางของภาวะสารอินทรีย์เป็น 1,490 มิลลิกรัม/ลิตร ($(\text{ค่าซีไอดีสูงสุด} + \text{ค่าซีไอดีต่ำสุด})/2$) ข้อมูลตามตารางที่ ข-1 เพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง ทำให้ได้ขอบเขตของภาวะสารอินทรีย์ เท่ากับ 745-2,235 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นการขยายขอบเขตของภาวะสารอินทรีย์ เพื่อรองรับภาวะสารอินทรีย์ของน้ำเสียจากโรงงานที่สูงขึ้นจากน้ำเสียที่เก็บมาวิเคราะห์เพื่อใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีค่าซีไอดีสูงสุด เท่ากับ 1,950 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารอ้างอิง

1. Lin, S. H. and K. L. Yeh. "Looking to treat wastewater. Try ozone." Chemical Engineer. 6 (1993) : 112-116.
2. สุรพล รักปทุม. โอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ภาพพิมพ์, 2543.
3. Liakou, S., M. Kornaros and G. Lyberatos. "Ozonation of azo dyes." Water Science Technology. 35 (1997) : 279-286.
4. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวด. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
5. Cooper, P. "Removing Color from Dyehouse Wastewater." Journal of Society of Dyer & Colourists. 109 (1993) : 1-3.
6. Chang, D. S. and P. C. Singer. "The Impact of Ozonation on Particle Stability and the Removal of TOC and THM Precursors." J.AWWA. 83(3), (1991) : 71-78.
7. ปารเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด, 2545.
8. "Kerma." Encyclopedia of Chemical Technology. 3 (1999) : 821-875.
9. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์สยามสดชื่นเนอร์ชี่พหลาย, 2542.
10. Manley, T. C. and S. J. Niegowski. "Ozone." Encyclopedia of Chemical Technology. 14 (1967) : 410-432.
11. สุรพล รักปทุม. โอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ภาพพิมพ์, 2543.
12. มั่นสิน ดัฒนเวศม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
13. Sawyer, C. N. and P. L. McCarthy. Chemistry for Sanitary Engineering. New York : McGraw-Hill Book Co., 1978.
14. Venosa, A. D. "Effectiveness of ozone as a municipal wastewater disinfectant." Annual Water Pollution Control Federation Conference. Atlanta, (1983) : 32-35.
15. Available online at http://www.ozoneapplication.com/info/ozone_properties.htm.
16. Available online at www.กระทรวงพลังงาน.com

17. Available online at www.eng.cmu.ac.th
18. Cheremisinoff, N. P. and P. N. Cheremisinoff. Water treatment and Waste Recovery Advanced Technology and Applications. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1993.
19. Majumdar, S. B. and O. J. Sproul. "Technical and Economic Aspects of Water and Wastewater Ozonation." Water Research. 9 (1974) : 253-260.
20. Gottschalk, C., A. Libra and A. Saupe. Ozonation of Water and Waste Water. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH., 2000.
21. Staehelin, J. and J. Hoigne. "Decomposition of Ozone in Water: Rate of Initiation by Hydroxide Ion and Hydrogen peroxide." Environmental Science and Technology. 16 (1982) : 676-681.
22. Hoigne, J. and H. Bader. "Determination of Ozone in Water by the Indigo Methode." Water Research. 15 (1981) : 449-456.
23. สุเมธ ชวเดช. การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันโอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
24. Douglas, C. M. Design and analysis of experiment. 6th ed. U.S.A.: John Wiley & Sons Inc., 2005.
25. Myers, R. H. Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.
26. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมการจัดน้ำเสีย เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์, 2539.
27. Montgomery, J. M. Water Treatment Principles and Design. New York: John Wiley & Sons Inc., 1985.
28. อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล. "การลอยตะกอนแบบการละลายอากาศ." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 6 (2538) : 39-45.
29. Vrablik, E.R. "Fundamental Principle of DAF of Industrial Waste." Proc. 14th Ind. Waste Conference, Eng. Bull Purdue University, Ext Ser No. 104 (1959) : 743-779.
30. Islam, A. M., B. Z. Chowdhry and M. J. Snowden. "Heteroaggregation in colloidal Dispersions." Advanced Colloid Interface Science. 62 (1995) : 109-136.
31. Milton, J. R. Surfactants and Interfacial Phenomena. 2nd ed. U.S.A.: John Wiley & Sons Inc., 1988.
32. Mike, K. "Zetapotential." Zetapotential Training Course. Malvern, (2001)

33. Konsowa, A. H. "Decolorization of wastewater containing direct dye by ozonation in a batch bubble column reactor." Desalination. 158 (2003) : 233-240.
34. Antonio, M., E. Santiago and S. Gabriele. "How and Why Combine Chemical and Biological Processes for Wastewater Treatment." Water Science Technology. 35 (1997) : 321- 327.
35. Alfafara, C.G., V.P. Migo, J.A. Amarante, R.F. Dallo and M. Matsumura. "Ozone Treatment of Distillery Stop Waste." IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, Taipei. 7th (1999) : 565-570.
36. Chalor Jarusuttthirak. Treatment of Textile Dyeing Wastewater by Ozone and Polyaluminium Chloride (PAC). AIT Thesis no.EV.95-7, Asian Institute of Technology, 1995.
37. Tzitzis, M., D.V. Vayenas and G. Lyberatos. "Pretreatment of textile industry wastewater with ozone." Water Science Technology. 29 (1994) :151-160.
38. Sheng H. Lin and Wen Y. Liu. "Treatment of textile wastewater by ozonation in packed-bed reactor." Environmental Technology. 15 (1994) : 299-311.
39. Beszedits, S. "Ozonation to decolor textile effluents." American Dyestuff Reporter. (August 1980) : 37-40.
40. Malik, P.K. and S.K. Saha. "Oxidation of direct dyes with hydrogen peroxide using ferrous ion as catalyst." Separation and Purification Technology. 31 (2003) : 241-250.
41. Liakou, S., S. Pavlou and G. Lyberatos. "Ozonation of azo dyes." Wat. Sci. Tech. 35(4), (1997) : 279-286.
42. Ensar, O., K. Bulent and C. Zeynep. "Ozonation of aqueous Bomaplex Red CR-L dye in a semi-batch reactor." Dyes and Pigment. 64 (2005) : 101-108.
43. Available online at <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/EQUILIBRIUM/iron.htm>
44. Available online at <http://pcdv1.pcd.go.th/Information/Regulations/WaterQuality/EffluentsThai.htm>
45. Shamrani, A. A., A. James and H. Xiao. "Destabilisation of oil-water emulsions and separation by dissolved air flotation." Water Research. 36 (2002) : 1503-1512.
46. Hoigne, J. and H. Bader. "A role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solution." Water Research. 10 (1976) : 376-386.

47. Fukushi, K., Y. Matsui and N. Tambo. "Dissolved air flotation : experiments and kinetic analysis." Journal of Water Supply : Research Technology-Aqua. 47 (1998) : 76-86.
48. ชารกมล ถาวรพานิช. ผลของโอโซนที่มีต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

1. การหาปริมาณตะกอนแขวนลอย (Suspended Solids)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
2. กรวยบุชเนอร์
3. เครื่องดูดอากาศ
4. ตู้อบความร้อน
5. โถทำแห้ง
6. เครื่องชั่ง

วิธีการวิเคราะห์

1. อบกระดาษกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งหาน้ำหนักกระดาษกรอง สมมติว่าเป็น A มิลลิกรัม
2. วางกระดาษกรองลงบนกรวยบุชเนอร์ ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศ
3. ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียกและให้ถูกดูดติดแน่นกับกรวยบุชเนอร์
4. กรองตัวอย่างน้ำตามปริมาตรที่ต้องการโดยอาศัยแรงดูดช่วย
5. ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรอจนกว่าจะแห้ง
6. ปิดเครื่องดูดอากาศ ใช้ปากคีบคีบกระดาษกรองใส่ภาชนะทนไฟ
7. นำไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้งใช้เวลา 1 ชั่วโมง
8. ทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องในโถทำแห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนักของกระดาษกรองใหม่ สมมติว่าเป็น B มิลลิกรัม

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (B-A)} \times 1000}{\text{มิลลิลิตรของตัวอย่างที่ใช้}} \quad (\text{ก-1})$$

2. การหาค่าความขุ่น (Turbidity)

โดยใช้เครื่องวัดความขุ่น ของบริษัท เจนเวย์ (JENWAY) รุ่น 6035 โดยใช้สารละลายมาตรฐาน 20 เอ็นทียู

วิธีการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องโดยกดปุ่ม I/O หน้าจอจะขึ้น ____ ให้เลือกทศนิยมโดยกดปุ่ม RANGE
2. วอร์มเครื่องประมาณ 15 นาที เซทศูนย์โดยใช้เซลล์ใส่น้ำกลั่น ใส่ลงในช่องว่างสำหรับใส่เซลล์
3. กดปุ่ม ZERO รอประมาณ 3 วินาที เพื่อเซทศูนย์ แล้วจึงนำเซลล์ออก

4. ใส่เซลล์ที่บรรจุสารละลายมาตรฐานที่ 20 เอ็นทียู ลงไปสำหรับใส่เซลล์ กดปุ่ม CAL (ในกรณีที่เครื่องอ่านแล้วถ้าไม่ตรงกับ 20 เอ็นทียู ให้ใช้ปุ่ม ในการปรับค่าให้อ่านได้ 20 เอ็นทียู แล้วกดปุ่ม CAL อีกครั้ง

5. นำเซลล์สารละลายมาตรฐานออกแล้ว ใส่เซลล์ของสารตัวอย่างที่ต้องการจะวัดลงไป กดปุ่ม READ เพื่อวัดความขุ่น หน่วยเป็น เอ็นทียู

6. ระวังอย่าให้มีฟองอากาศในสารตัวอย่าง และเช็ดเซลล์ให้สะอาดอย่าให้มีรอยนิ้วมือ ก่อนจะใส่เซลล์ลงในช่องใส่เซลล์

7. การทำความสะอาดเซลล์ให้ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้งและห้ามใช้แปรงล้างเพราะจะทำให้เซลล์เกิดรอยขีดข่วน ในกรณีที่ทำการวัดสารตัวอย่างให้ล้างเซลล์ด้วยสารตัวอย่าง 1 หรือ 2 ครั้ง ก่อนที่จะวัดความขุ่น

3. การหาค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

โดยใช้เครื่องวัดค่าพีเอช รุ่น 1120 ของบริษัท เมทเลอร์ โทเลโด (METTLER TOLEDO)

วิธีการวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

2. ฉีดล้างแท่งวัดค่าพีเอชด้วยน้ำกลั่น

3. นำแท่งวัดค่าพีเอชจุ่มลงในบีกเกอร์ แล้ววัดค่าที่ได้จากเครื่อง

4. การหาค่าสี

โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ของ บริษัท ยูนิแคม (UNICAM) รุ่น UV 500 จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ได้มาเปรียบเทียบกับ ภาพที่ ก-1 เพื่อหาค่าสี

วิธีการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ขึ้นคำว่า HOME ให้กดปุ่ม Remote ที่อยู่บนเครื่อง และกดปุ่ม F1 ที่คีย์บอร์ดของเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ กับคอมพิวเตอร์

2. เข้าโปรแกรมโดยคลิกที่ไอคอน UV 500

3. ทำการเปิดหลอดกำเนิดแสงที่หน้าต่าง Status จากนั้นคลิกที่ปุ่ม D₂ จะขึ้นหน้าต่าง Lamps คลิกที่ปุ่ม Switch Lamp On รอประมาณ 3 นาที ปุ่ม D₂ จะเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีฟ้า คลิกปุ่ม OK

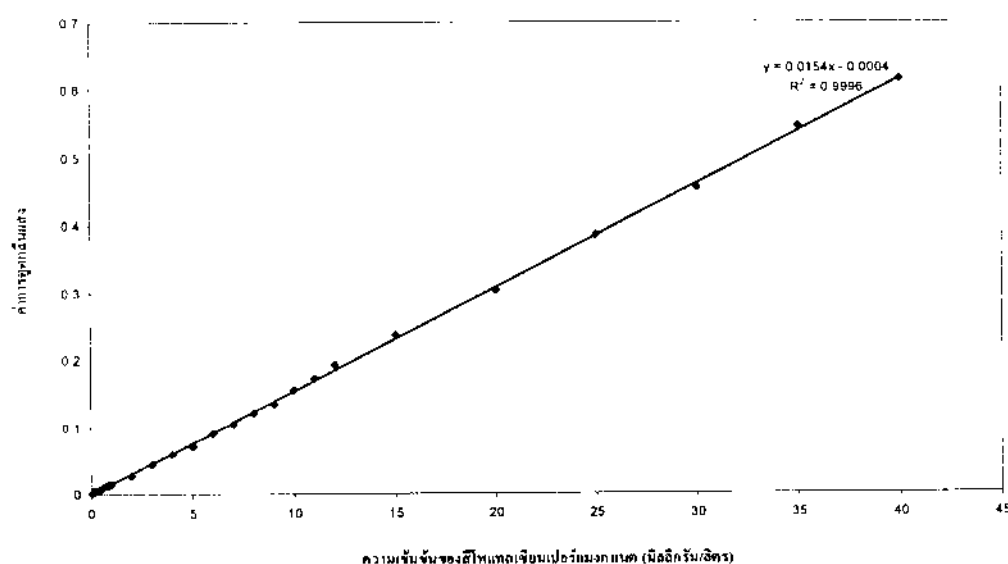
4. ปรับความยาวคลื่นที่ต้องการใช้ที่หน้าต่าง Fixed Method โดยคลิกที่ช่อง Wavelengths แล้วใส่ค่าที่ต้องการ ซึ่งในการทดลองจะใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 526 นาโนเมตร เนื่องจาก ภาพที่ ก-2 แสดงให้เห็นว่า สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะดูดกลืนแสงได้สูงสุด ที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร

5. ตั้งค่าการวัดซ้ำที่ช่อง Cycles

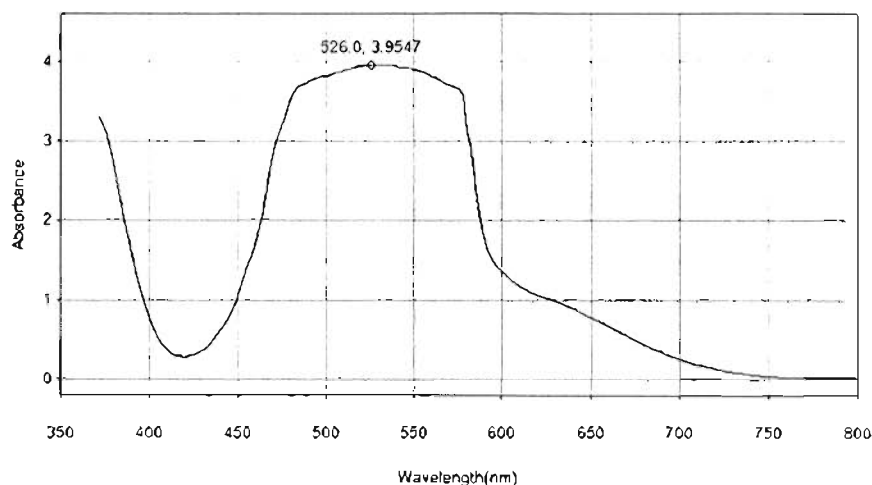
6. ก่อนการวัดจะต้องทำการวัดเบงค์ทุกครั้ง การวัดเบงค์ทำโดยนำน้ำกลั่นใส่ลงในเซลล์ยูวีทั้ง 2 เซลล์ และนำไปใส่ในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยให้ด้านใสอยู่ด้านหน้า แล้วทำการตั้งค่าศูนย์ โดยคลิกปุ่ม Command → Zero → Proceed

7. หลังจากตั้งค่าศูนย์แล้วนำเซลล์ยูวีด้าน Sample ออกมาล้างแล้วใส่สารที่ต้องการจะวัด จากนั้นให้กดปุ่ม Run เพื่อทำการวัดค่า แล้วเครื่องจะขึ้นหน้าจอให้เปลี่ยนชื่อ ให้คลิกตรงคำว่า Sample แล้วใส่ชื่อที่ต้องการ

8. อ่านค่าที่วัดได้ และทำการเปลี่ยนตัวอย่างใหม่ โดยที่ก่อนการวัดสารตัวใหม่ ต้องล้างเซลล์ยูวีด้วยน้ำกลั่นทุกครั้ง



ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสีโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและค่าการดูดกลืนแสง



ภาพที่ ก-2 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

5. การหาค่าศักย์ซีต้า (Zetapotential)

โดยใช้เครื่องวัดศักย์ซีต้า (Zetapotential Analyzer) ของบริษัท มาลเวอร์น (Malvern) รุ่น 3000 HAS

วิธีการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องวัดศักย์ซีต้าและเครื่องคอมพิวเตอร์
2. เข้าโปรแกรมโดยคลิกที่ไอคอน Zetasizer 3000HS-Standard และกดปุ่ม Zeta ที่เป็นไอคอนที่อยู่บนเมนูบาร์ รอประมาณ 15 นาที
3. เข้า Measure → Document จาก Menu List ทำการตั้งชื่อสารที่ช่อง Sample Detail คลิก OK รอประมาณ 30 วินาที เพื่อให้เครื่องทำอุณหภูมิตามที่ตั้งไว้ คือ 25 องศาเซลเซียส
4. ทำการฉีดสารเข้าไปประมาณ 3 มิลลิลิตร และกดปุ่ม GO ในการวัดเครื่องจะทำการวัดซ้ำให้ 3 ครั้ง

6. การหาค่าซีโอดี

โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ซีโอดี (COD Reactor) ของ บริษัทแฮช (HACH) รุ่น 45600 และเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ของ บริษัท แฮช (HACH) รุ่น DR/2010

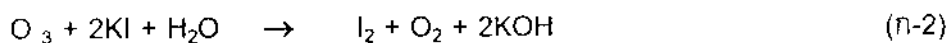
วิธีการวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดรีเอเจนท์ (Reagent) ของบริษัทแฮช (HACH)
2. ทำแบงก์ โดยนำน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดรีเอเจนท์
3. นำหลอดรีเอเจนท์ไปต้มในเครื่องปฏิกรณ์ซีโอดี ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4. ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำหลอดรีเอเจนท์ไปวัดค่าซีโอดี โดยใช้เครื่องเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ใช้โปรแกรม 435 ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

7. การหาปริมาณโอโซน

หาปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซนโดยวิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric Method) เป็นการวัดปริมาณโอโซนในรูปสารละลาย (Solution Phase) อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วระหว่างโอโซนและไอโอไดด์ ดังสมการที่ ก-2



จากสมการที่ ก-2 สามารถวัดปริมาณโอโซนได้โดยทำการไทเทรตไอโอดีนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับโพแทสเซียมไอโอไดด์ ด้วยโซเดียมโซอิลเฟต และใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์

วิธีการวิเคราะห์

1. ต่อเครื่องผลิตโอโซนเข้ากับขวดรูปชมฟูไบที่ 1 และ 2 ตามภาพที่ ก-3 ซึ่งแต่ละใบบรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 เปอร์เซ็นต์ อยู่ 400 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการเปิดเครื่องผลิตโอโซนเป็นเวลา 60 นาที

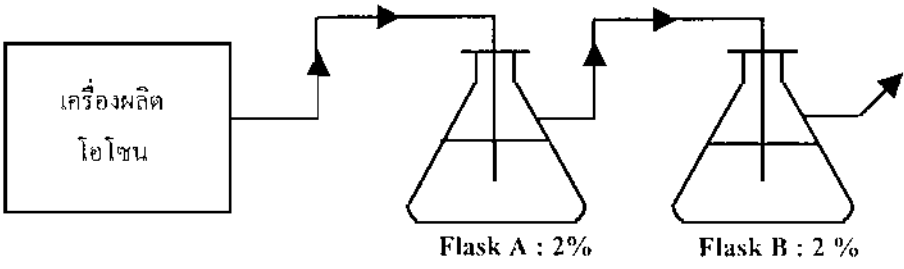
2. เมื่อครบตามเวลาการทำงานของเครื่องผลิตโอโซนแล้ว นำสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์จากขวดรูปชมฟูไบที่ 1 และ 2 มาไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน แล้วเติมน้ำแบ่งลงไป 4 มิลลิลิตร ได้สารละลายสีน้ำเงิน แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมโซอิลเฟต จนกระทั่งสีน้ำเงินหายไป บันทึกปริมาณของสารละลายโซเดียมโซอิลเฟตที่ใช้ไปในขวดรูปชมฟูไบที่ 1 และ 2

3. คำนวณอัตราการผลิตโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน ตามสมการ ก-3

$$\text{POR} = (V_{\text{titrant 1}} \times N_1 + V_{\text{titrant 2}} \times N_2) \times 24 \quad (\text{ก-3})$$

โดยที่ POR คือ อัตราของโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)

$V_{\text{titrant 1}}$ และ $V_{\text{titrant 2}}$ คือ ปริมาตรของโซเดียมโซอิลเฟต เข้มข้น 0.1 นอร์มัล ในขวดรูปชมฟู (flash) ไบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ ก-3 การทดลองหาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

วันที่เก็บตัวอย่าง	พารามิเตอร์									
	ซีโอดี (mg/l)		ตะกอนแขวนลอย (mg/l)		ความขุ่น (N.T.U.)		พีเอช		ค่าสี (mg/l)	ดัชนีชี้วัด (mV)
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	หลัง
10/11/04	16800	1420	930	106	686	38.3	5.66	4.7	20.18	5.1
17/11/04	15850	1110	780	122	593	39.2	6.64	3.22	13.22	5
24/11/04	17650	1965	1140	171	624	53.7	6.93	4.8	25.35	6.3
2/12/04	15550	1015	730	95	575	36.8	7.75	5.36	12.76	4.1
8/12/04	16400	1290	870	127	653	42.3	6.62	4.3	16.31	5.8
15/12/04	15950	1040	690	108	564	37.6	5.78	3.82	11.89	3.1
เฉลี่ย	16367	1306	860	121.5	633	41.32	6.56	4.36	16.61	4.7

ตารางที่ ข-2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เวลาในการโอโซนเนชั่นต่างๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ
1,940 มิลลิกรัม/ลิตร และพีเอช เท่ากับ 4.3

เวลาโอโซนเนชั่น (นาที)	ก่อนโอโซนเนชั่น		หลังโอโซนเนชั่น		ประสิทธิภาพ การกำจัดสี (%)
	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าสี (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าสี (mg/l)	
10	0.4868	31.6364	0.1710	11.1328	64.81
15	0.4866	31.6234	0.1539	10.0183	68.32
20	0.4859	31.5779	0.1350	8.7913	72.16
25	0.4871	31.6558	0.1259	8.1989	74.1
30	0.4868	31.6364	0.1005	6.5519	79.29
35	0.4891	31.7857	0.0838	5.4703	82.79
40	0.4882	31.7273	0.0660	4.3149	86.4
45	0.4882	31.7273	0.0534	3.4963	88.98
50	0.4880	31.7143	0.0357	2.3469	92.6
55	0.4877	31.6948	0.0205	1.3565	95.72
60	0.4876	31.6883	0.0070	0.4817	98.48
65	0.4796	31.1688	0.0085	0.5766	98.15
70	0.4861	31.5909	0.0074	0.5055	98.4

ตารางที่ ข-3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดที่สภาวะต่างๆ

ลำดับที่	ภาระสารอินทรีย์ (mg/l)	พีเอช	เวลา (นาที)	ก่อนไฮโดรเนชั่น		หลังไฮโดรเนชั่น		ประสิทธิภาพการ กำจัด (%)
				ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าสี (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าสี (mg/l)	
1	1300	7	35	0.3852	25.0390	0.0836	5.4545	78.22
2	1300	3	35	0.3780	24.5714	0.1087	7.0844	71.18
3	915	9	20	0.2246	14.6104	0.0229	1.5130	89.63
4	1300	7	60	0.3365	21.8766	0.0294	1.9351	91.14
5	1300	7	35	0.3852	25.0390	0.0864	5.6364	77.48
6	1300	7	35	0.3852	25.0390	0.0840	5.4805	78.1
7	915	5	50	0.2239	14.5649	0.0323	2.1234	85.42
8	1950	7	35	0.4771	31.0065	0.1391	9.0584	70.79
9	1700	5	20	0.4125	26.8117	0.1304	8.4935	68.32
10	1300	7	35	0.3852	25.0390	0.0849	5.5390	77.89
11	1700	9	20	0.4234	27.5195	0.1261	8.2143	70.16
12	1300	11	35	0.3687	23.9675	0.0553	3.6169	84.90
13	1300	7	35	0.3852	25.0390	0.0819	5.3442	78.66
14	1700	9	50	0.4234	27.5195	0.0712	4.6494	83.11
15	1300	7	35	0.3852	25.0390	0.0845	5.5130	77.98
16	1300	7	10	0.3852	25.0390	0.1616	10.5195	57.98
17	915	5	20	0.2239	14.5649	0.0396	2.5974	82.15
18	650	7	35	0.1498	9.7532	0.0024	0.1818	98.15
19	915	9	50	0.2246	14.6104	0.0101	0.6818	95.32
20	1700	5	50	0.4125	26.8117	0.0583	3.8117	85.78

ตารางที่ ข-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและความขุ่นที่เวลาในการโอโซนเนชั่นต่างๆ
 ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความขุ่นเริ่มต้น เท่ากับ 22 N.T.U.
 พีเอช เท่ากับ 4.2 ทดลองที่อัตราส่วนวิวาร์ เท่ากับ 25%

เวลาโอโซนเนชั่น (นาที)	ประสิทธิภาพ กำจัดสี (%)	ความขุ่นหลัง โอโซนเนชั่น (N.T.U.)	ความขุ่นหลัง ลอยตะกอน (N.T.U.)	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น หลังลอยตะกอน (%)
0	0	22	31.10	-41.36
5	58.14	23.20	26.80	-15.52
10	64.91	23.60	26.00	-10.17
15	67.63	25.30	27.20	-7.51
20	72.31	26.00	26.60	-2.31
25	78.62	26.40	19.80	25.00
30	80.11	27.00	15.00	44.44
35	82.87	27.00	14.80	45.19
40	87.25	27.80	14.00	49.64
45	89.47	28.50	12.70	55.44
50	93.72	30.60	12.40	59.48
55	97.80	29.70	12.10	59.26
60	99.12	30.00	11.90	60.33
65	99.10	30.00	11.80	60.67
70	98.85	29.80	11.90	60.07

ตารางที่ ข-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นที่อัตราส่วนวอเตอร์ต่างๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความชื้นเริ่มต้น เท่ากับ 22 N.T.U. พีเอช เท่ากับ 4.2 เวลาในการโอโซนนิ่ง เท่ากับ 60 นาที

อัตราส่วนVR (%)	ความชื้นหลัง (N.T.U.)	ความชื้นหลังลอยตะกอน (N.T.U.)	ประสิทธิภาพกำจัดความชื้นหลังลอยตะกอน (%)
5	29.80	14.80	50.33
10	29.50	13.00	55.93
15	30.80	13.20	57.14
20	30.50	13.10	57.05
25	30.00	12.00	60.00
30	29.50	11.70	60.34
35	29.00	11.60	60.00

ตารางที่ ข-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นหลังลอยตะกอนที่อัตราส่วนวอเตอร์ต่างๆ ที่ซีโอดีเท่ากับ 1,310 ความชื้นเริ่มต้น เท่ากับ 11.6 เอ็นทียู พีเอช เท่ากับ 4.1 เวลาในการโอโซนนิ่ง เท่ากับ 30 นาที

อัตราส่วน VR (%)	ความชื้นหลังโอโซน (N.T.U.)	ความชื้นหลังลอยตะกอน (N.T.U.)	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นหลังลอยตะกอน (%)
10	12.80	12.70	0.78
15	13.10	12.90	1.53
20	12.70	12.50	1.57
25	12.80	12.60	1.56
30	13.00	12.90	0.77

ตารางที่ ข-7 ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดการจัดความชุ่มชื้นและประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ลดตะกอนที่สภาวะต่างๆที่ใส่โอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร ความชุ่มชื้นเริ่มต้น เท่ากับ 22 N.T.U. เพื่อเริ่มต้น เท่ากับ 4.2

ลำดับที่	อัตราส่วนVR (%)	พีเอช	เวลาโอโซน (นาที)	ความชุ่มชื้น โอโซน (N.T.U.)	ความชุ่มชื้นหลังลดตะกอน (N.T.U.)	ประสิทธิภาพกำจัดความชุ่มชื้น (%)	ประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ ลดตะกอน (%)
1	30	7	43	31.23	10.47	66.49	56.42
2	18	7	43	31.20	13.03	58.23	50.72
3	10	5	53	31.50	14.83	52.91	48.21
4	18	7	43	31.07	13.1	57.83	50.25
5	5	7	43	31.33	15.2	51.49	49.06
6	18	7	43	31.20	12.87	58.76	51.33
7	10	5	32	28.10	14.87	47.09	41.79
8	10	9	53	32.93	14.17	56.98	52.67
9	18	7	60	34.87	12.77	63.38	56.79
10	18	3	43	28.27	13.17	53.42	45.03
11	18	11	43	33.67	13.37	60.30	53.14
12	25	9	32	30.47	11.3	62.91	53.64
13	10	9	32	30.30	14.67	51.60	46.74
14	18	7	43	31.63	12.9	59.22	51.87
15	25	9	53	32.67	11.63	64.39	55.5
16	18	7	43	31.53	12.9	59.09	51.72
17	18	7	43	31.53	12.8	59.41	52.1
18	25	5	32	28.37	11.4	59.81	49.77
19	25	5	53	31.37	11.4	63.66	54.57
20	18	7	25	27.13	12.83	52.70	44.2

ตารางที่ ข-8 ผลของศักย์ซีดำที่สภาวะต่างๆ ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,960 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช เริ่มต้นเท่ากับ 4.2 ศักย์ซีดำเริ่มต้น เท่ากับ 7.8 มิลลิโวลต์

ลำดับที่	อัตราส่วน VR (%)	พีเอช	เวลาโอโซเนชั่น (นาที)	ศักย์ซีดำหลังปรับพีเอช (mV)	ศักย์ซีดำหลังโอโซเนชั่น (mV)
1	30	7	43	5.4	2
2	18	7	43	5	2.4
3	10	5	53	7.1	3.3
4	18	7	43	5.4	2.1
5	5	7	43	5.1	2.2
6	18	7	43	5	2
7	10	5	32	6.9	5.3
8	10	9	53	-1	-6.7
9	18	7	60	5.1	-0.5
10	18	3	43	8.8	5.7
11	18	11	43	-2.6	-7.9
12	25	9	32	-1.2	-3.3
13	10	9	32	-1.4	-3.1
14	18	7	43	5.7	2.2
15	25	9	53	-1.2	-7
16	18	7	43	5.3	2.2
17	18	7	43	5.6	2.4
18	25	5	32	7.1	5.1
19	25	5	53	7	3.3
20	18	7	25	5.1	3.9

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นางสาวอรชฎา ชันดีกุล
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนเข้มข้นร่วมกับ
 การลอยตะกอน ด้วยหลักการละลายของอากาศ
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี

ประวัติ

สถานที่ติดต่อ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 พระนครเหนือ 1518 ถนนพิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 10800 โทรศัพท์ 0-2913-2500-24 ต่อ 8236, 8230 โทรสาร 0-2587-0024

ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2540-2544 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิศวกรรมเคมีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ประวัติการฝึกงาน เมษายน - พฤษภาคม 2543 บริษัท ฝาจีบ จำกัด (มหาชน)

ประวัติการทำงาน ตุลาคม 2543 - เมษายน 2546 บริษัท เมดิทอป จำกัด ตำแหน่ง
 Product Specialist

ผลงานทางวิชาการ การประยุกต์ใช้ฟิล์มโพลีเมอร์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน