

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การบำบัดน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย

การรวมตะกอนทางเคมีและโอโซนเนชัน

TREATMENT OF DISTILLERY SLOP THROUGH BIOGAS

PROCESS BY COAGULATION-FLOCCULATION

AND OZONATION



T117300

นายธนิต เจนจบ

นายยุรพันธ์ เล็กน้อย

นางสาววันวิสาข์ จิตเสน

เลขทะเบียน 117300
วันเดือนปี 20 ก.ค. 2554

b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

**TREATMENT OF DISTILLERY SLOP THROUGH BIOGAS
PROCESS BY COAGULATION-FLOCCULATION
AND OZONATION**

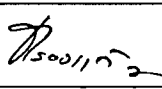
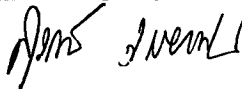

MR. THANIT	JANJOP
MR. YURANAN	LEKNOI
MISS WANVISA	CHITSEN

**A SPECIAL PROJECT, SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการ
รวมตะกอนทางเคมีร่วมกับ โอโซนชั้น
Treatment of Distillery Slop through Biogas Process by Coagulation-
Flocculation and Ozonation

ชื่อนักศึกษา	นายธนิศ	เจนจบ	50050454
	นายยุรนนท์	เล็กน้อย	50050486
	นางสาววันวิสาข์	จิตเสน	50050500
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	
ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน	
ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย การรวมตะกอนทางเคมีและ โอโซเนชัน	
ชื่อนักศึกษา	นายธนิต	เจนจบ
	นายสุรนนท์	เล็กน้อย
	นางสาววันวิสาข์	จิตเสน
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
ปีการศึกษา	2553	
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรวมตะกอนทางเคมีและ โอโซเนชัน จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมีเปรียบเทียบระหว่างพอลิลูมิเนียมคลอไรด์และเฟอริกคลอไรด์ พบว่าพอลิลูมิเนียมคลอไรด์ให้ผลการบำบัดดีกว่าเฟอริกคลอไรด์ โดยที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าซีโอดีจาก 44,800 มิลลิกรัมต่อลิตรลงเหลือ 32,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม พบว่าที่พีเอช 9 สามารถลดค่าซีโอดีได้ถึง 30% หากเพิ่มประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีการใช้สารช่วยรวมตะกอนแอนไอออน พอลิเมอร์ ที่ความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดค่าซีโอดีลงเหลือ 30,400 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 32% การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ โอโซเนชันในการกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำกากส่าที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมี ทำการทดลองแบบครั้ง (Batch) ด้วยเครื่องกำเนิดโอโซน ที่มีอัตราการผลิตเท่ากับ 7.63 กรัมต่อชั่วโมง ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง แปรค่าพีเอชที่ 6, 7, 9 และ 11 พบว่าก๊าซโอโซนสามารถลดค่าสารอินทรีย์ ในน้ำกากส่าลงได้ โดยที่พีเอช 9 สามารถลดค่าซีโอดี ค่าทีโอดีและความเข้มข้นในหน่วย ADMI ได้ 48%, 25% และ 90% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน BOD₅/COD ของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วยก๊าซ โอโซน พบว่าที่พีเอช 7 น้ำเสียมีค่าอัตราส่วน BOD₅/COD เพิ่มขึ้นสูงสุดจาก 0.0301 เป็น 0.2355 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ โอโซเนชันมีส่วนในการเพิ่มความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ได้

คำสำคัญ : การรวมตะกอนทางเคมี, น้ำเสียกากส่า, สารอินทรีย์คาร์บอน, โอโซเนชัน

Title	Treatment of Distillery Slop through Biogas Process by Coagulation-Flocculation and Ozonation.	
Student	Tanit	Janjob
	Yuranan	Leknoi
	Wanvisa	Chitsen
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Resource Chemistry	
Academic Year	2010	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Chalor Jarusutthirak	

ABSTRACT

This special project studied treatment of distillery slop through biogas process by coagulation/flocculation and ozonation. Optimum conditions in coagulation/flocculation were investigated. It was found that polyaluminium chloride(PACl) provided better performance in removal of COD than ferric chloride(FeCl₃). With a concentration of 500 mg/L PACl reduced COD from 44,800 mg/L to 32,800 mg/L. At an optimum pH of 9 COD removal efficiency was found to be 30%. With an enhancement of anion polymer at a concentration of 1.25 mg/L, the COD was decreased to 30,400 mg/L, equivalent to 32% removal efficiency. Ozonation of distillery slop wastewater after coagulation/flocculation was conducted in batch tests using an ozone generator with a production rate of 7.63 g/hr, and a contact time of 3 hrs. The effects of pH on ozonation was studied at varying pH of 6, 7, 9, and 11. The results showed that ozonation was able to remove organic compounds and color in distillery slop wastewater. At pH of 9, the removal efficiency for COD, TOC, and color intensity (ADMI) were 48%, 25%, and 50%, respectively. According to BOD/COD ratio of wastewater, it was found that ozone-treated wastewater at pH of 7 employed higher BOD/COD ratio than the initial, from 0.0301 to 0.2355, indicating higher biodegradability of organic compounds.

Keywords : Coagulation and Flocculation, Distillery Slop, Organic carbon, Ozonation

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ อาจารย์คณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ และอาจารย์ที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดทั้ง 4 ปี ทั้งให้คำแนะนำ คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท พี.เอส.ซี.เทคคิงแอนด์คิเวลลีโอปเม้นท์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องผลิตไอโซน และคุณพงษ์เทพ เกิดคอนแฝก กรรมการผู้จัดการบริษัท พี.เอส.ซี.เทคคิงแอนด์คิเวลลีโอปเม้นท์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียวากดำ สารรวมตะกอนพอลิอูมิเนียมคลอไรด์ และสารช่วยรวมตะกอนแอนไอออน พอลิเมอร์เพื่อใช้ในการทดลอง

นายธนิต	เจนจบ
นายชูนันท์	เล็กน้อย
นางสาววันวิสาข์	จิตเสน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กากน้ำตาล	4
2.1.1 ลักษณะของกากน้ำตาล	4
2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาล	4
2.1.3 การแยกผลึกน้ำตาล	5
2.2 อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล	5
2.2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล	5
2.2.1.2 กระบวนการหมัก	6
2.2.1.3 กระบวนการกลั่น	6
2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิต	7
2.4 เมลานอยคิน (Melanoidins)	10
2.4.1 โครงสร้างของเมลานอยคิน	10
2.4.2 ปฏิกริยาในการเกิดเมลานอยคิน	12
2.4.3 การบำบัดสีที่เกิดจากเมลานอยคิน	13
2.5 การบำบัดน้ำเสียจากลำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 วิธีการบำบัดทางเคมี	13
2.5.1.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี	13
2.5.1.2 การออกซิเดชันทางเคมี	14
2.5.2 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ	14
2.5.2.1 แบบใช้ออกซิเจน	14
2.5.2.2 แบบไม่ใช้ออกซิเจน	15
2.6 โคแอกกูเลชัน (Coagulation) และ ฟล็อกกูเลชัน (Flocculation)	16
2.6.1 โคแอกกูเลชัน	16
2.6.1.1 สารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารสร้างตะกอน	17
2.6.1.2 สารช่วยรวมตะกอน	19
2.6.2 ฟล็อกกูเลชัน	20
2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการจับตัวและรวมตัวกันเป็นฟล็อก	20
2.7 โอโซน	21
2.7.1 สมบัติของ โอโซน	21
2.7.2 การเกิด โอโซน	22
2.7.3 ปฏิกิริยาของ โอโซนชั้น	23
2.7.3.1 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยตรง	24
2.7.3.2 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเกิดผ่านแรดิคอลล	27
2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ โอโซนชั้น	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	33
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี	33
3.1.1 อุปกรณ์	33
3.1.2 สารเคมี	34
3.2 การดำเนินงานวิจัย	34
3.2.1 การติดตั้งและเดินระบบ โอโซนชั้น	36
3.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมี	38
3.2.3.1 ศึกษาสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของสารรวมตะกอน ที่เหมาะสมในการรวมตะกอน	38
3.2.3.2 ศึกษาค่าพีเอชของสารรวมตะกอนที่เหมาะสมในการรวมตะกอน	39
3.2.5.4 ศึกษาความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนที่เหมาะสมในการรวมตะกอน	39
3.2.4 การศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนด้วย โอโซนเนชัน	39
3.2.5 การศึกษาผลของโอโซนเนชันต่อความสามารถใน การถูกย่อยสลายทางชีวภาพและความเข้มข้น ในหน่วย ADMI	40
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	41
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากลำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	41
4.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมี	41
4.3 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าด้วย โอโซนเนชัน	44
4.4 การศึกษาความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสี้ยวกากส่า	48
4.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของน้ำเสี้ยวกากส่าด้วย โอโซนเนชัน	49
4.6 ผลการบำบัดน้ำกากส่าด้วยการรวมตะกอนทางเคมีและ โอโซนเนชัน	50
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลวิจัย	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์	58
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ลักษณะน้ำเสียจากการหมักก่อนและหลังกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ	8
2-2	ลักษณะน้ำเสียในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล จากการใช้วัตถุดิบประเภทต่างๆ	9
2-3	สมบัติทางกายภาพของโอโซน	22
3-1	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์	40
4-1	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งกากสำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	41
4-2	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งกากสำที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีและ โอโซนเนชัน	51
ก-1	การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ	62
ก-2	ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ	66
ก-3	การเลือกเจือจางน้ำตัวอย่างให้เหมาะสมในการหาค่า BOD	70
ก-4	การเลือกปริมาณตัวอย่างน้ำทิ้งที่เหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์สภาพต่าง	72
ข-1	ค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้สารรวมตะกอนที่ความเข้มข้นต่างๆ	77
ข-2	ค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ที่แปรค่าพีเอชต่างๆ	77
ข-3	ค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้สารช่วยรวมตะกอน คือแอนไอออน พอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	77
ข-4	ค่าซีโอดี ทีโอซีและค่าอนินทรีย์คาร์บอนของน้ำเสียที่ผ่าน โอโซนเนชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ	78
ข-5	ค่าบีโอดีของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วย โอโซนเนชัน	79
ข-6	ค่าความเข้มข้นในหน่วยเอดีเอ็ม ไอและค่าอัลคาไลน์ตี้ก่อนและหลังการบำบัดด้วย โอโซนเนชัน	80
ข-7	ความเข้มข้นของ โอโซนที่ผลิตได้ ความเข้มข้นของ โอโซนที่เหลือและเกิดปฏิกิริยา ที่ช่วงเวลาต่างๆ	80

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2-1	ขั้นตอนการผลิตน้ำตาล	4
2-2	ขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล	6
2-3	โครงสร้างพื้นฐานของเมลานอยดิน	11
2-4	แผนผังของปฏิกิริยามอลาร์ด	12
2-5	การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดีสชาร์จ	23
2-6	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนชั้นทั้งทางตรงและทางอ้อม	24
2-7	การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลของโอโซน	24
2-8	การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole - mediate attack	25
2-9	การสลายตัวของอัลดีไฮด์และคีโตนด้วยก๊าซโอโซน	25
2-10	การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Electrophilic attack	25
2-11	ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับฟินอลแบบ Electrophilic attack	26
3-1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมใน การรวมตะกอนทางเคมี	35
3-2	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการศึกษาโอโซนชั้นที่มีผลต่อน้ำเสียกากสำ	36
3-3	รายละเอียดแบบจำลองถึงปฏิกิริยา	37
3-4	การติดตั้งระบบโอโซนชั้น	37
4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับค่าพีเอช ของสารรวมตะกอนเฟอริกคลอไรด์และ พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์	42
4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับค่าพีเอชของสารรวมตะกอน พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์	43
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับความเข้มข้นของแอนไอออน พอลิเมอร์	44
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนชั้น ที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11	45
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซโอโซนที่ถูกใช้กับเวลา ที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11	46
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนชั้น ที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอซี กับเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนชั้น ที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11	48
4-8	อัตราส่วน BOD ₅ /COD ของน้ำเสียกากส่า ก่อนและหลัง โอโซนชั้น	49
4-9	ความเข้มข้นในหน่วย ADMI ก่อนและหลังผ่าน โอโซนชั้น	50
ก-1	กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมเอทานอล อุตสาหกรรมแอลกอฮอล์ เป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการหมักสารอินทรีย์กับจุลินทรีย์หรือยีสต์ เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานทดแทนหรือนำไปใช้งานอื่นๆ อุตสาหกรรมการหมักเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดน้ำเสียที่เรียกว่า น้ำกากสำ (Distillery slop) อุตสาหกรรมสุราที่ใช้วัตถุดิบจำพวกกากน้ำตาล (Sugar molasses) ก็ก่อให้เกิดน้ำกากสำเช่นเดียวกัน น้ำกากสำนี้มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และมีความเป็นกรดสูง มีค่าซีโอดี 65,000 – 130,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าบีโอดี 30,000 – 96,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีกลิ่นที่แรงและมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำเสียโดยการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ถูกเปลี่ยนอยู่ในรูปของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คงเหลืออยู่แต่สารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก อย่างไรก็ตามน้ำกากสำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพยังคงมีค่าสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีสูง ในขณะที่ค่าบีโอดีต่ำ แสดงถึงความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ต่ำ สารที่พบและทำให้เกิดสีในน้ำเสียประเภทนี้คือเมลานอยดิน (Melanoidins) เป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำ มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูง (Feng *et al.*, 2008) หากน้ำเสียเหล่านี้ไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้องแล้ว ย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Coca *et al.*, 2005)

การบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ในปัจจุบันใช้กระบวนการทางเคมีกายภาพ (Physicochemical process) เช่น โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน เป็นต้น แล้วตามด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เช่นระบบตะกอนเร่ง แต่วิธีเหล่านี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำ และไม่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีสีเข้มและไม่สามารถกำจัดเมลานอยดินได้ (Pena *et al.*, 2002)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีโดยโอโซน ซึ่งเป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำสำหรับน้ำดื่ม เนื่องจากสามารถกำจัดสี กลิ่น รสได้เป็นอย่างดี และได้มีการประยุกต์ใช้กับโรงงานสีย้อมหรือน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น สารประกอบฟีนอลิก พบว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก ในการกำจัดและนอกจากนี้ยังลดค่าซีโอดีได้มากที่สุดประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีการทำลายสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลต่ำ โอโซนชันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) วัดจากค่าอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี (BOD/COD ratio) ได้มากถึง 40 เปอร์เซ็นต์ (Ryan *et al.*, 2009)

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียกากสำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยโคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และ โอโซนชัน เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียที่มีอนุภาคคอลลอยด์

การจมน้ำของอนุภาคคอลลอยด์จะใช้เวลานาน ดังนั้นจึงต้องรวมตะกอนคอลลอยด์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน โดยมีสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 2 ชนิดคือ เฟอริกคลอไรด์และพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ และใช้สารช่วยรวมตะกอนแอนไอออน พอลิเมอร์ เพื่อช่วยให้การรวมตะกอนดีขึ้น เพื่อให้ได้น้ำเสียที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อยที่สุดและนำน้ำเสียนั้นเข้าสู่โอโซนเนชัน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส และค่าพีเอช หากพบว่าความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น น้ำเสียดังกล่าวอาจจะเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ รวมทั้งเป็นการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียและพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมประกาศไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี ของน้ำเสียดักสำ
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดักสำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีและ โอโซนเนชัน
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียดักสำด้วย โอโซนเนชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียดักสำจากโรงงานผลิตเอทานอลที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
2. ทำการทดลองหาความเหมาะสมในการรวมตะกอนหรือจาร์เทส (Jar test) โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการรวมตะกอนทางเคมี ดังนี้
 - สารรวมตะกอนที่ใช้ คือ เฟอริกคลอไรด์ และพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ แปรค่าความเข้มข้น 300, 500, 750 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - แปรค่าพีเอชที่ 7, 8, 9 และ 10
 - สารช่วยรวมตะกอน (Coagulation aid) คือ แอนไอออน พอลิเมอร์ (Anion polymer) แปรค่าความเข้มข้นที่ 1.25, 2.5, 3.75, 5, 7.5 และ 12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. เครื่องผลิตก๊าซโอโซนเป็นเครื่องมือระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ก๊าซออกซิเจนในอากาศอัดเป็นสารตั้งต้น ปรับอัตราการไหลของอากาศที่ 5 ลิตรต่อนาที และมีอัตราการผลิตก๊าซโอโซนเท่ากับ 7.63 กรัมต่อชั่วโมง (เจตนานิพนธ์และคณะ ,2552)

4. ทำการทดลองแบบครั้ง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดด้วยโอโซนเนชันดังนี้
 - ค่าพีเอชแปรค่าที่ 6, 7, 9 และ 11
 - ระยะเวลาสัมผัสแปรค่าที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที
5. พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คือ ซีโอดี บีโอดี ทีโอดี และความเข้มข้นในหน่วย ADMI

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี และ โอโซนเนชันในการบำบัดน้ำเสีย กากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีในน้ำเสียกากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
3. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเหมาะสมกับน้ำเสียกากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

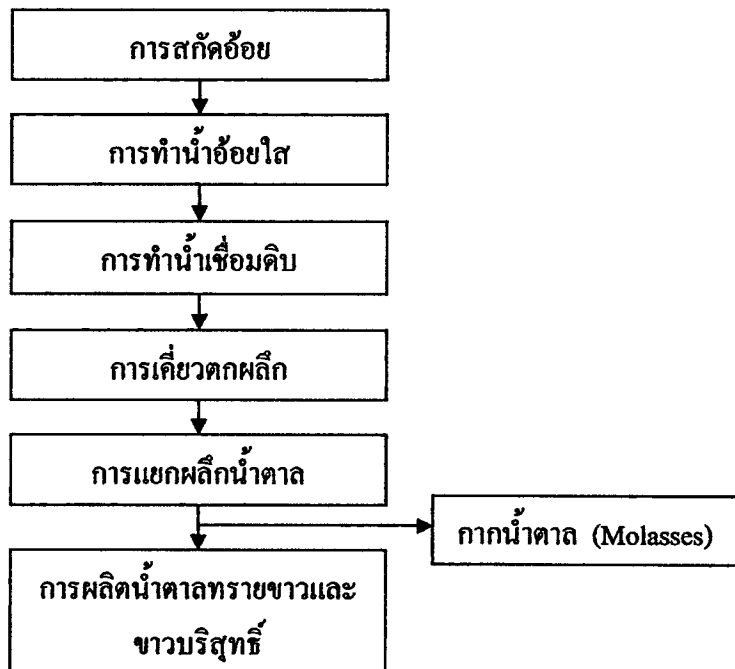
2.1 กากน้ำตาล (Molasses)

2.1.1 ลักษณะของกากน้ำตาล

กากน้ำตาล เป็นของเหลวสีน้ำตาลที่เหนียวข้นซึ่งไม่สามารถจะตกผลึกน้ำตาลได้อีก เป็นเนื้อของสิ่งที่ไม่ใช่ น้ำตาลที่ละลายปนอยู่ในน้ำอ้อย ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำตาลซูโครส น้ำตาลอินเวอร์ท (Invert sugar) และสารเคมี เช่น ปูนขาว ซึ่งใช้ในการตกตะกอนให้น้ำอ้อยใส ส่วนประกอบของกากน้ำตาลจะไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับพันธุ์อ้อยและกรรมวิธีการผลิต โดยส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส น้ำตาลอินเวอร์ทกับน้ำ ปัจจุบันโรงงานน้ำตาลมีความสามารถในการสกัดน้ำตาลออกจากกากน้ำตาลได้มากขึ้นแต่ก็ไม่หมดในครั้งเดียว เพราะถ้าสกัดให้ออกหมดจริงจะเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงมีน้ำตาลซูโครสบางส่วนที่สูญเสียไปกับกากน้ำตาล ซึ่งจะสูญเสียไปมากกว่าสูญเสียไปทางอื่น โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลเฉลี่ย 7.5 เปอร์เซ็นต์

2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาล (กนกศักดิ์ เอี่ยมโสภาสและคณะ, 2543)

กระบวนการผลิตน้ำตาลประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ขั้นตอนการผลิตน้ำตาล

2.1.3 การแยกผลึกน้ำตาล

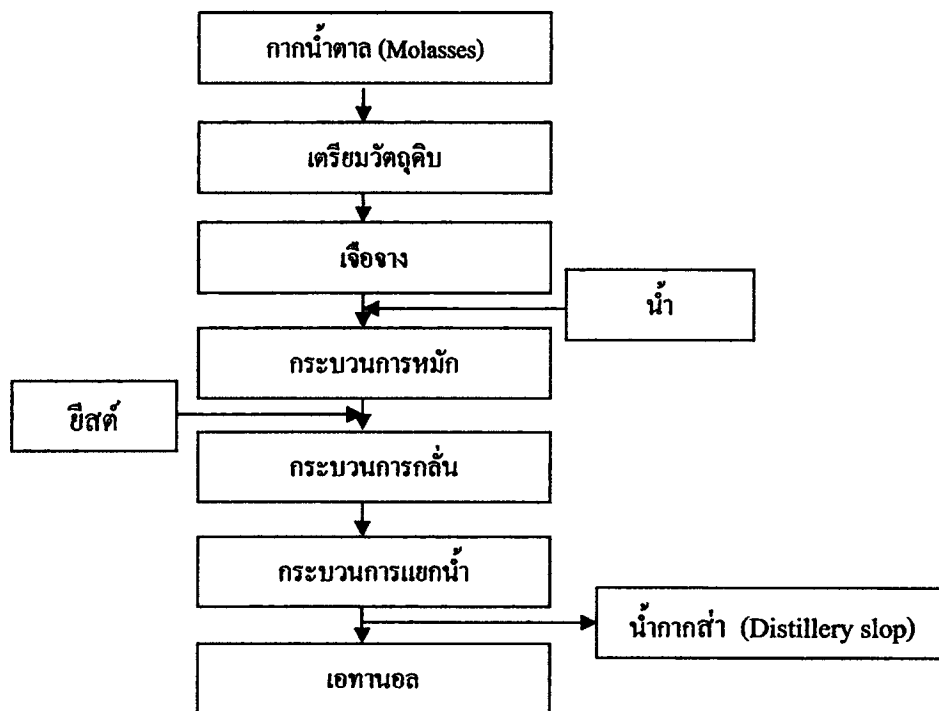
กระบวนการแยกผลึกน้ำตาล โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่ารางกวน (Crystallizer) และ หม้อปั่น (Centrifugal tank) ผลึกน้ำตาลและน้ำเลี้ยงผลึกซึ่งเรียกว่า แมสคิวทิต (Massecurite) ถูกส่งผ่าน รางกวนเพื่อพักเกลือค้ำน้ำตาล หลังจากนั้นจึงถูกส่งเข้าสู่หม้อปั่นเพื่อแยกน้ำตาลออกเป็นส่วนต่างๆ ได้แก่

- แมสคิวทิต เมื่อผ่านหม้อปั่นได้น้ำตาลเอ ใช้ทำน้ำตาลทรายขาวและขาวบริสุทธิ์ ส่วนที่แยกออกเรียกว่ากากน้ำตาลเอ (A-Molasses)
- กากน้ำตาลเอ ถูกนำไปเคี่ยวที่หม้อเคี่ยวอีกชุดหนึ่งได้แมสคิวทิต บี เมื่อปั่นแยกผลึก ได้เป็นน้ำตาลบี ซึ่งได้เป็นน้ำตาลทรายดิบ (Raw sugar) ส่งขายต่างประเทศและ กากน้ำตาลบี (B-Molasses)
- กากน้ำตาลบี ถูกนำไปเคี่ยวที่หม้อเคี่ยวอีกชุดหนึ่ง ได้แมสคิวทิต ซี (C-Molasses) เมื่อปั่นแยกผลึกออกได้เป็นน้ำตาลซี ซึ่งเป็นกากน้ำตาลสุดท้ายที่เรียกว่า Final Molasses นำไปเก็บในถังโมลาสต่อไป

2.2 อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล

2.2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล

การใช้กากน้ำตาลหมักร่วมกับยีสต์โดยใช้กากน้ำตาล 1 ตัน สามารถผลิตเอทานอลได้ 260 ลิตร กากน้ำตาลเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล กระบวนการผลิตเอทานอลจาก กากน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 2-2 โดยทั่วไปอ้อย 1 ตันจะได้กากน้ำตาลประมาณ 45-50 กิโลกรัมต่อตันอ้อย ปริมาณผลิตไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของอ้อย กากน้ำตาลที่ผลิตได้จะใช้บริโภค ภายในประเทศและส่งออก การใช้ภายในประเทศส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสุราและ แอลกอฮอล์อีกทั้งยังใช้อุตสาหกรรมผลิตยีสต์ ซีอิ๊ว และผงชูรส



รูปที่ 2-2 ขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

2.2.1.2 กระบวนกรหมัก

ในกระบวนกรหมัก จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ยีสต์ การเลือกใช้ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมกับวัตถุดิบที่นำมาหมักจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมัก ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการหมักคือเอทานอลที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8-12 โดยปริมาตร

น้ำหมักที่ได้จากการหมักจะนำมาแยกเอทานอลออกโดยใช้กระบวนกรกลั่น ลำดับส่วนซึ่งสามารถแยกเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 95 โดยปริมาตร

2.2.1.3 กระบวนกรกลั่น

น้ำหมักที่เกิดขึ้นจะถูกป้อนไปยังหอกลั่นเพื่อแยกกากและน้ำออกบางส่วน เพื่อให้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ขึ้นเป็นประมาณร้อยละ 96 แอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักจะเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 9-10 การกลั่นแยกแอลกอฮอล์จากน้ำกากส่าทำได้โดย อาศัยความร้อนจากไอน้ำ เพื่อแยกเอาแอลกอฮอล์ซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำให้ระเหยกลายเป็นไอ แล้วจึงนำไอแอลกอฮอล์ที่ได้ส่งเข้าเครื่องควบแน่นทำให้ไอเป็นของเหลว จุดเดือดของแอลกอฮอล์อยู่ที่ 78.3 องศาเซลเซียส

การกลั่นให้ได้แอลกอฮอล์เปอร์เซ็นต์สูงๆ ต้องทำให้แอลกอฮอล์ระเหยและควบแน่นหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งความเข้มข้นของแอลกอฮอล์จะสูงขึ้น ภายในหม้อกลั่นจึงทำเป็นหลายชั้น แต่ละชั้นเหมือนกับการทำให้ระเหยและควบแน่น 1 ครั้ง การกลั่นโดยใช้หม้อกลั่นจึงทำให้ได้แอลกอฮอล์ความเข้มข้นสูงได้โดยกลั่นเพียงครั้งเดียว แต่ไม่สามารถกลั่นให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 เพราะเมื่อกั่นจนแอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 96 ความเข้มข้นของไอแอลกอฮอล์ที่ระเหยออกมาจากของเหลว จะเท่ากับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ในของเหลว จึงทำให้ไม่สามารถกลั่นแยกแอลกอฮอล์ให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 ได้ โดยน้ำกาฬสำที่เหลืออีก 4 เปอร์เซ็นต์ จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนสุดท้าย

2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

จากการสำรวจสถานภาพการจัดการของเสีย ของโรงงานผลิตเอทานอลที่มีในปัจจุบัน โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549) กล่าวว่า ของเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลส่วนหนึ่งคือ น้ำเสีย หรือน้ำกาฬสำ ซึ่งปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเอทานอลประมาณ 1,000 – 1,500 ลบ.ม. ต่อกำลังการผลิตเอทานอล 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งในน้ำกาฬสำจะมีเซลล์ชีสค์ปนเปื้อนอยู่ด้วย ทั้งนี้คุณภาพของน้ำกาฬสำจะแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นมันเส้น จะมีค่าความสกปรกในรูปบีโอดีและซีโอดีเป็น 15,000 – 35,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 40,000 – 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนกากน้ำตาลจะมีค่าความสกปรกในรูป บีโอดีและซีโอดีเป็น 40,000 – 70,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 70,000 – 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในส่วนของน้ำกาฬสำไม่มีการแยกเซลล์ชีสค์มาใช้ประโยชน์ แต่จะนำน้ำกาฬสำไปผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ในบางโรงงานที่มีการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล จะมีการนำน้ำกาฬสำมาใช้ในการผลิตปุ๋ย โดยผสมกับกากที่เหลือทิ้งจากการกรองน้ำเชื่อมของโรงงานน้ำตาลหรือขานอ้อย เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอล แสดงดังตารางที่ 2-1 และตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 ลักษณะน้ำเสียจากการหมักก่อนและหลังกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

พารามิเตอร์	น้ำเสียจากการหมัก	น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ
pH	3.0-4.5	7.5-8
BOD ₅ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	50,000-60,000	8,000-10,000
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	110,000-190,000	45,000-52,000
TS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	110,000-190,000	70,000-75,000
TVS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80,000-120,000	68,000-70,000
TSS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	13,000-15,000	38,000-42,000
TDS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	90,000-150,000	30,000-32,000
Chlorides (มิลลิกรัมต่อลิตร)	8,000-8,500	7,000-9,000
Phenols (มิลลิกรัมต่อลิตร)	8,000-10,000	7,000-8,000
Sulphate (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7,500-9,000	3,000-5,000
Phosphate (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,500-2,700	1,500-1,700
Total nitrogen(มิลลิกรัมต่อลิตร)	5,000-7,000	4,000-4,200

ที่มา : Mohana *et al.*, 2009

ตารางที่ 2-2 ลักษณะน้ำเสียในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล จากการใช้วัตถุดิบประเภทต่างๆ

วัตถุดิบที่ใช้		Stillage yield L/L EtOH	BOD g/L	COD g/L	COD/ BOD	N (total) mg/L	P (total) mg/L	K mg/L	Total S as SO ₄ mg/L	pH
กากน้ำตาล จากหัวบีท	ค่าเฉลี่ย	11.6	44.9	91.1	1.95	3569	163	10030	3716	5.35
	SD	0.3	21.7	38.9	0.21	2694	66	6322	2015	1.02
	จำนวนตัวอย่าง	3	3	5	3	5	3	2	4	4
น้ำอ้อย	ค่าเฉลี่ย	16.3	16.7	30.4	1.96	628	130	1952	1356	4.04
	SD	5.3	3.4	8.2	0.35	316	110	1151	1396	0.49
	จำนวนตัวอย่าง	2	5	6	4	6	6	5	5	7
กากน้ำตาล จากอ้อย	ค่าเฉลี่ย	14.0	39.0	84.9	2.49	1229	187	5124	3478	4.46
	SD	3.3	10.8	30.6	0.57	639	350	3102	2517	0.35
	จำนวนตัวอย่าง	7	19	22	16	20	17	12	16	25
เชลลูโลส	ค่าเฉลี่ย	11.1	27.6	61.3	2.49	2787	28	39	651	5.35
	SD	4.14	15.2	40.0	0.54	4554	30	-	122	0.53
	จำนวนตัวอย่าง	4	11	15	10	8	5	1	6	7

ที่มา : Wilkie *et al.*, 2000

2.4 เมลานอยดิน (Melanoidins)

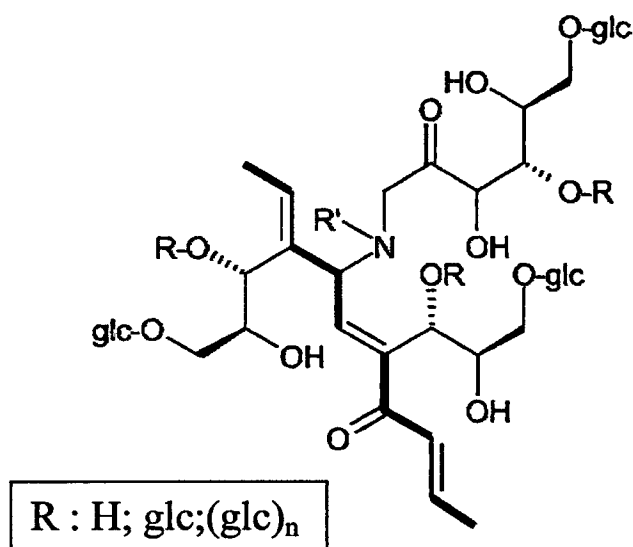
เมลานอยดิน เป็นสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสีน้ำตาล และพบว่า เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon) พบได้ตามธรรมชาติ เช่น แหล่งน้ำธรรมชาติ แม่น้ำ เป็นต้น และพบในอาหารและเครื่องดื่ม ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากอุตสาหกรรมเกษตร เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมปัง กาแฟ เบียร์ สีน้ำตาลที่พบเป็นสีจากเมลานอยดิน ดังนั้นในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวจะพบเมลานอยดินที่สูงเช่นในน้ำเสียจากน้ำตาล จากการผลิตน้ำตาลทราย เมลานอยดินเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) จากขั้นตอนของปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzymatic browning) ที่เกิดจากกระบวนการให้ความร้อนระหว่างสารประกอบอะมิโนและคาร์โบไฮเดรต (Liang *et al.*, 2009) เมลานอยดิน เป็นสารฮิวมิก (Humic substances) มีคุณสมบัติเป็นกรดและเป็นพอลิเมอร์ (Polymeric) และพบว่ามีกระจายสูง เนื่องจากเป็นประจุลบ ที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ฟีนอลิก มวลของเมลานอยดินจะเพิ่มขึ้น ถ้าน้ำตาลและกรดอะมิโน ได้รับความร้อนสูงและค่าความเป็นด่างในสารละลาย คอลลอยด์ของเมลานอยดิน มีน้ำหนักมวลโมเลกุลระหว่าง 40-70 กิโลดาลตัน ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและความเป็นด่างจะถูกรายงานในรูปของการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerisation) และขนาดของคอลลอยด์ อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนของเมลานอยดินที่สังเคราะห์ในสารละลาย มีค่าอยู่ที่ 6.2-13.7 ซึ่งจะเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา (Dwyer *et al.*, 2009)

2.4.1 โครงสร้างของเมลานอยดิน (Chandra *et al.*, 2008)

เมลานอยดิน เป็นสารประกอบอะมิโน-คาร์บอนิล (Amino-carbonyl compounds) มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูง ในการแยกเมลานอยดินออกจากสารประกอบทางชีวภาพหรืออาหาร เป็นสิ่งที่ทำได้ยากโครงสร้างของเมลานอยดินไม่มีความแน่นอนและไม่ชัดเจน วิธีการศึกษาโครงสร้างสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โปรโตนิค นิวเคลียร์ แมกเนติก แรโซแนนซ์ (Protonic nuclear magnetic resonance, ^1H NMR) ครอส โพลาลาไรซ์-แมกเนติก แอลเจด สปีนนิ่ง นิวเคลียร์ แมกเนติก แรโซแนนซ์ (CP-MAS NMR) เป็นต้น จากการทดลองพบว่า เมลานอยดินประกอบด้วยธาตุ 4 ชนิดภายในโครงสร้างหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน พันธะที่พบส่วนใหญ่คือ พันธะเอไมด์ พันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอน พันธะคู่ของคาร์บอน-ไนโตรเจน และพันธะของคาร์บอนต่างๆ ดังนี้

1. $\text{CH}_3\text{-CO-R}$
2. $\text{CH}_3\text{-C (H หรือ OH) =C (H หรือ OH)-CO-R''}$
3. R-CO-CO-R'
4. $\text{R-CO-CH(CH}_3\text{)-CO-R'}$
5. $\text{R-CO-CH}_2\text{-CO-R'}$
6. $\text{R-CO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CO-R'}$
7. $\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CO-R'}$
8. อื่นๆ

จากโครงสร้างดังรูปที่ 2-3 พบว่าส่วนใหญ่เป็นพันธะคู่ ซึ่งเป็นพันธะไม่อิ่มตัวและเป็นหมู่โครโมฟอร์ที่สำคัญของเมลานอยดิน แต่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนสำหรับโครงสร้างโครโมฟอร์ของเมลานอยดิน

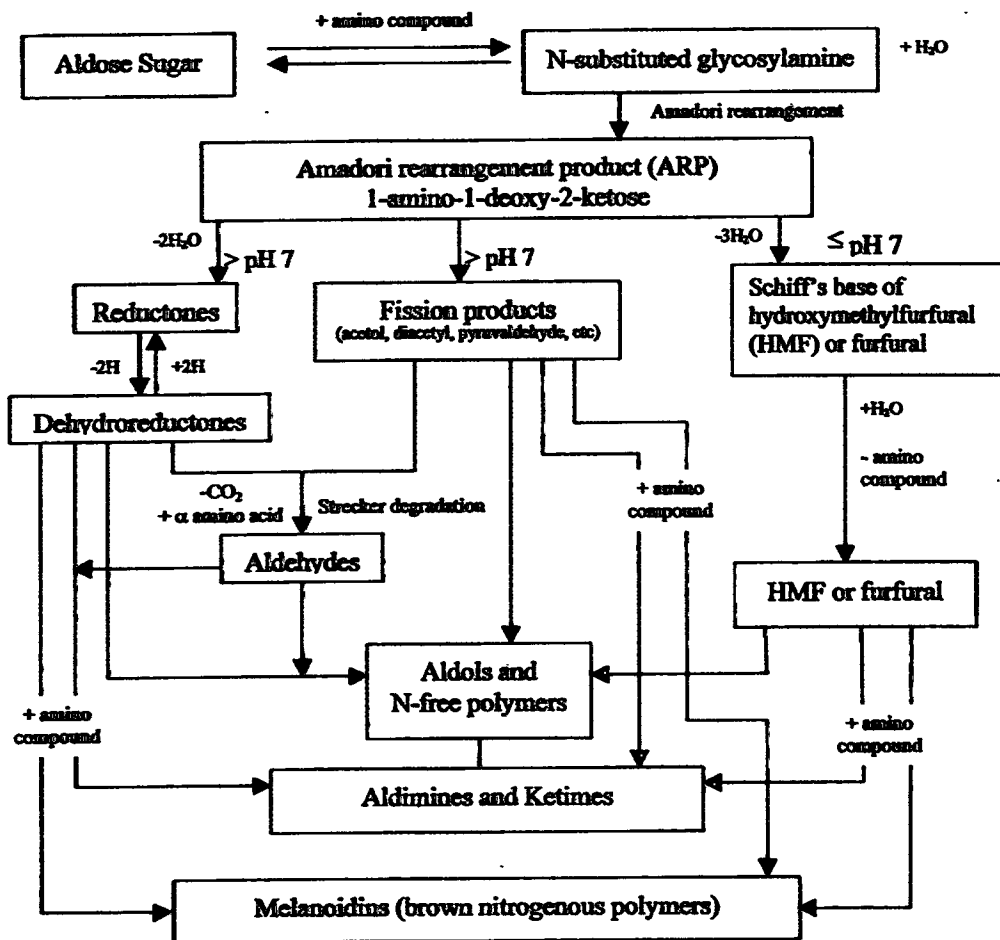


รูปที่ 2-3 โครงสร้างพื้นฐานของเมลานอยดินที่สร้างขึ้นจาก 3-deoxyhexosuloses และ Amadori rearrangement product (Cammerer *et al.*, 2002)

โครงสร้างและขนาดของเมลานอยดินขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการเกิด ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยา เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ ระยะเวลาในการให้ความร้อน และสารละลายที่ใช้

2.4.2 ปฏิกิริยาในการเกิดเมลานอยดิน

สารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาคือน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่ง ซึ่งเกิดได้ทั้งทีโตสและแอลโดสรวมกับ หมู่อะมิโนได้เป็น ไกลโคซิลเอมีน (N-substituted glycosylamine) เกิดการเรียงตัวใหม่มีชื่อเรียกว่า Amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (Aldoseamine) หรือทีโตสเอมีน (Ketoseamine) เรียกว่า Amadori product เกิดปฏิกิริยา Enolization ของ Amadori product จะได้ ทีโตสเอมีนหรือ หมู่ไฮดรอกซิลเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไปได้เป็นอนุพันธ์ของฟูแรน (Furan) ถ้าเป็นน้ำตาล เฮกโซส อนุพันธ์ฟูแรนคือ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอรัลดีไฮด์ (5-hydroxymethyl-2-furaldehyde) หรือ HMF ซึ่งสามารถเกิดพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว ได้สารสีน้ำตาลที่เรียกว่า เมลานอยดิน แสดง ปฏิกิริยาเมลลาร์ดจากน้ำตาลแอลโดส ดังรูป 2-4 (รุ่งทิพย์, 2549)



รูปที่ 2-4 แผนผังของปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Martins et al., 2001)

2.4.3 การบำบัดสีที่เกิดจากเมลานอยดิน

เมลานอยดินเป็นสาเหตุของการมีสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกรมหมัก เช่น แอลกอฮอล์ เอทานอล สุรา เป็นต้น และเป็นปัญหาหลักในการบำบัด เนื่องจากมีสีที่เข้มข้น การบำบัดด้วยกระบวนการไร้อากาศและใช้อากาศ สามารถลดเมลานอยดินได้เพียง 6-7 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น การบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งสามารถลดค่าซีโอดีได้แต่สีไม่สามารถกำจัดได้ (Yavuz, 2006)

น้ำเสียที่มีเมลานอยดินต้องได้รับการบำบัด เนื่องจากคุณสมบัติละลายน้ำได้ จึงเป็นปัญหาต่อระบบนิเวศทางดินและแหล่งน้ำได้ หากไม่ได้รับการบำบัด เพราะมีค่าความสกปรกของน้ำเสียสูง จากการศึกษาพบว่า การบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีกายภาพ (Physicochemical treatment) เช่น กระบวนการสร้างตะกอน (Flocculation) เพื่อให้เมลานอยดินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถูกแยกออก กระบวนการโอโซนเนชัน (Ozonation) คือการใช้โอโซนทำลายพันธะไม่อิ่มตัว เมลานอยดินจะมีขนาดเล็กและหมู่โครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีลดลงอย่างมาก และ การใช้สารประเภทแอกทีฟ ออกซิเจน (Active oxygen) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งแนะนำให้ใช้ค่าพีเอชช่วง 7-10 จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) การบำบัดดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงมีการใช้รา (Fungi) เช่น *Coriolus*, *Aspergillus*, *Phanerochaete* หรือ แบคทีเรีย (Bacterial) เช่น *Bacillus*, *Alkaligenes* และ *Lactobacillus* ซึ่งวิธีที่กล่าวมาข้างต้นประสบความสำเร็จในการกำจัดสีที่เกิดจากเมลานอยดิน (Chandra et al., 2008)

2.5 การบำบัดน้ำเสียจากลำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

2.5.1 วิธีการบำบัดทางเคมี

2.5.1.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี

น้ำเสียจากลำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่ามีความขุ่นที่เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal partical) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ขนาดของคอลลอยด์อยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 1 ไมครอน ทำให้ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองในเวลาจำกัด จากการคำนวณพบว่า การตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์ขนาด 1×10^{-4} มิลลิเมตร ระยะทาง 1 เมตร ใช้เวลาถึง 730 วัน ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีช่วยในการทำให้เกิดการตกตะกอนและแยกออกจากน้ำเพื่อนำไปบำบัดขั้นต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การใช้สารตกตะกอนกับน้ำจากลำมีหลากหลายได้แก่ สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น (มันสิน, 2537)

2.5.1.2 การออกซิเดชันทางเคมี

น้ำเสียจากสามีค่าซีโอไซด์และบีโอดีที่สูงมาก มีกลิ่นแรงและมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ การใช้กระบวนการทางชีวภาพในบางครั้งไม่สามารถลดค่าซีโอดีที่สูงนี้ได้และมีสีที่เข้มอยู่ เนื่องจากมีสารประกอบอินทรีย์พอลิเมอร์ขนาดใหญ่อยู่ เช่น เมลานอยดิน (Melanoidins) ซึ่งสารประกอบชนิดนี้สามารถกำจัดได้โดยการออกซิเดชันทางเคมี การออกซิเดชันด้วยโอโซนเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถทำลายสารอินทรีย์อันตรายที่ย่อยสลายยากได้แล้วยังฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียได้อีกด้วย และจากการศึกษาก่อนหน้านี้ยังพบว่าสามารถทำลายสารประกอบฟีนอลิกได้เป็นอย่างดี (Pena *et al.*, 2002)

2.5.2 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพหรือโดยใช้จุลินทรีย์ เป็นวิธีที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงไว้ในถังเลี้ยงเชื้อ ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง จุลินทรีย์อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้ (มันสิน, 2542)

2.5.2.1 แบบใช้ออกซิเจน (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2551)

สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ขึ้นจำนวนมาก (ประมาณร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์) ข้อได้เปรียบของกระบวนการบำบัดแบบนี้คือ ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น แต่มีข้อเสียคือต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง เนื่องจากต้องมีการพ่นอากาศให้กับระบบ และยังคงกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกิน นอกจากนี้กระบวนการบำบัดแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กับน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงมากๆ เนื่องจากมีข้อจำกัดในการให้ออกซิเจนอย่างเพียงพอกับระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน ระบบสระเติมอากาศระบบตะกอนเร่งเป็นต้น

- ระบบสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon system)

สระเติมอากาศมักจะเป็นบ่อดิน หรือบ่อคาคอนกรีต โดยพัฒนาจากบ่อย่อยสลายธรรมชาติที่ส่งกลิ่นเหม็น จึงมีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศ เพื่อช่วยรับภาระน้ำเสียที่เข้ามาให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้ลดปัญหากลิ่นเหม็นที่เกิดจากบ่อดังกล่าว ระบบนี้เป็นระบบที่เติบโตแบบแขวนลอย ดังนั้นเครื่องเติมอากาศจึงมีหน้าที่ทั้งให้ออกซิเจนแก่จุลินทรีย์ในระบบ พร้อมๆกันนั้นช่วยให้จุลินทรีย์ได้แขวนลอยอยู่ในน้ำในสระเติมออกซิเจน

- ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge System)

ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพที่นิยมใช้กันมาก โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีปริมาณมากพอสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จุลินทรีย์เหล่านี้จะลอยอยู่ในน้ำตะกอนของถังเติมอากาศ ซึ่งจุลินทรีย์จะขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณขึ้นในลักษณะที่เรียกว่าการเจริญเติบโตแบบแขวนลอย โดยทั่วไปภายในถังเติมอากาศจะมีระบบกวน ซึ่งมักจะใช้

เครื่องจักรกลทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์หรือสัตว์น้ำสลัดจ์แขวนลอยอยู่ในถังเดิมอากาศตลอดเวลา เพื่อที่สามารถควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ภายในระบบตะกอนเร่งได้เป็นที่ต้องการ ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบแยกน้ำใสออกจากน้ำสลัดจ์ซึ่งนิยมใช้ถังตกตะกอนทำหน้าที่แยกน้ำทิ้งออกจากน้ำสลัดจ์ เพื่อปล่อยน้ำทิ้งที่ใสไหลล้นออกจากถังตกตะกอน ส่วนบริเวณก้นถังตกตะกอนจะมีความเข้มข้นของน้ำสลัดจ์มาก ซึ่งมักจะนำกลับไปสู่ถังเดิมอากาศเพื่อช่วยในการควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในถังเดิมอากาศได้ ถ้าพบว่าระบบมีน้ำสลัดจ์มากเกินไปเกินความต้องการ ก็อาจสูบล้างจากก้นถังตกตะกอนหรือจากถังเดิมอากาศโดยตรงก็ได้

2.5.2.2 แบบไม่ใช้ออกซิเจน (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2551)

กระบวนการนี้สารอินทรีย์ในน้ำเสียประมาณร้อยละ 80-90 ถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งรวมเรียกว่า ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ระบบดังกล่าวนี้ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายมีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้าทำให้ระบบเริ่มต้นได้ช้า อีกทั้งประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำ จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการกักเก็บของเหลว (Hydraulic Retention Time ; HRT) นานขึ้น ระบบบำบัดจึงมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ระบบยังมีการปรับตัวไม่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม และในระหว่างกำจัดบางครั้งอาจมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดขึ้นด้วย ทำให้มีกลิ่นเหม็น ระบบนี้จึงมีข้อจำกัดการใช้งาน

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีการนำก๊าซชีวภาพกลับไปใช้เป็นพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีการนำกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกันมากขึ้น ทั้งนี้เพราะนอกจากช่วยในการบำบัดแล้วยังให้ผลิตภัณฑ์ที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ด้วย ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน เช่น ถังยูเอเอสบี และบ่อหมัก และระบบงานหมุนชีวภาพ เป็นต้น

- ถังยูเอเอสบี

เป็นถังหมักประเภทย่อยสลายเร็วถึงเร็วมาก หลักการทำงานของถังหมักอาศัยการป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังหมัก และปล่อยให้น้ำเสียไหลผ่านชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ด้านล่างของถังหมัก จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ทั้งสารอินทรีย์ที่เป็นสารละลายและสารแขวนลอย ทำให้เปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพ มีผลทำให้ค่าซีโอดี บีโอดี สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง น้ำก็จะสะอาดขึ้น ยิ่งสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกย่อยสลายเปลี่ยนรูปกลายเป็นก๊าซชีวภาพมากเท่าไร ก็ยิ่งจะทำให้ น้ำที่ผ่านการหมักย่อยแล้ว สะอาดมากขึ้นเท่านั้น (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, มปป) ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่น้ำเสียมีค่าซีโอดีและบีโอดีสูงๆ รวมทั้งโรงงานผลิตเอทานอลที่เกิดน้ำเสียจากสำ จะนิยมบำบัดน้ำเสียโดยใช้การบำบัดแบบถังยูเอเอสบีนี้

2.6 โคนอกกุลเลชัน (Coagulation) และ ฟลอคกุลเลชัน (Flocculation)

2.6.1 โคนอกกุลเลชัน (Coagulation)

เป็นกระบวนการทำลายประจุอนุภาคของคอลลอยด์ เนื่องจากพื้นผิวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก จะมีแรงอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic) และแรงอินเตอร์ไอออนิก (Interionic) ซึ่งแรงทั้งสองจะมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของโลก ทำให้เกิดแรงยี้ระหว่างอนุภาคจนไม่สามารถตกตะกอนได้ ดังนั้นจึงต้องใส่สารสร้างตะกอน (Coagulant) เพื่อทำลายเสถียรภาพ ทำให้ขนาดอนุภาคสามารถสัมผัสกันและรวมตัวกันใหญ่ขึ้นได้ (ศักดิ์ชัย, 2539)

กลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (Destabilization) ด้วยกระบวนการ โคนอกกุลเลชัน มีกลไกที่สำคัญ 4 แบบ (มันสิน, 2537) คือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer) โดยลดค่าเซต้าโพเทนเชียล (Zeta potential) เนื่องจากการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาคทำให้ความหนาของชั้นกระจายลดลง

2. การดูดซับผิวและการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization) โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับประจุของอนุภาคคอลลอยด์ และสามารถดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้

3. การจับอนุภาคคอลลอยด์ ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep coagulation) โดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป ทำให้ได้ผลึกของสารประกอบ สามารถห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ผลึกขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น

4. การใช้สารพอลิเมอร์ เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer bridging) โดยสารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิดเช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิด โปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถใช้สร้างตะกอนในการกำจัดคอลลอยด์ เนื่องจากพอลิเมอร์มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อใส่ไปในน้ำจะมีไอออนจำนวนมากเพื่อเกาะจับกับขนาดอนุภาคคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆ เกิดการรวมตัวขนาดใหญ่ได้

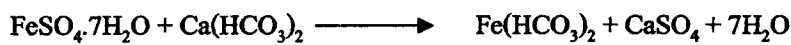
2.6.1.1 สารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารสร้างตะกอน (เกรียงศักดิ์, 2547 และพรศักดิ์, มปป.)

1. สารส้ม (Alum) หรือ อลูมิเนียมซัลเฟต $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$ นิยมใช้มากในการบำบัดน้ำเสียและการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เพื่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำ เมื่อใส่สารส้มลงไปในพื้นที่ที่มีอัลคาไลน์ (Alkalinity) เกิดปฏิกิริยา ดังนี้

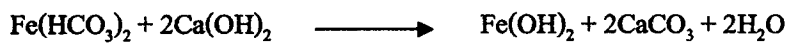


อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) ซึ่งเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ มีลักษณะคล้ายฟล็อก ตกตะกอนลงมาพร้อมกับของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียลงด้วย แต่การใช้อัลคาไลน์จากน้ำจะทำให้พีเอชของน้ำลดลง ดังนั้นถ้าน้ำเสียมีก่ออัลคาไลน์ไม่เพียงพอ ต้องใส่สารเคมี เช่น แคลเซียมไบคาร์บอเนต โซดาแอช โซดาไฟ หรือ ปูนขาวผลึกน้ำ

2. เฟอร์รัสซัลเฟตและปูนขาว (Ferrous sulfate and lime) การใส่สารเฟอร์รัสซัลเฟต เพียงอย่างเดียวจะไม่เกิดตะกอนผลึก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมปูนขาวลงไปด้วย



เมื่อเติมปูนขาวลงไป จะได้

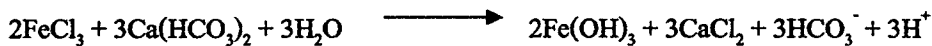


ถ้ามีออกซิเจนเพียงพอจะได้



ผลึกของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ จะมีเนื้อแน่น และตกตะกอนได้เร็ว การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตจะต้องควบคุมควบคุมปริมาณปูนขาวอย่างถูกต้อง หากเติมมากเกินไปจะเกิดการตกผลึกของหินปูนภายในท่อส่งน้ำได้

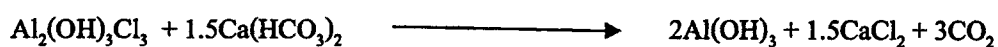
3. เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) มีสูตรโมเลกุลคือ $FeCl_3$ มีลักษณะผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเขียวหรือดำ และในสารละลายมีสีน้ำตาลแกมเหลือง ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ สารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางโดยใช้ประจุลบที่เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ เฟอร์ริกคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตอัลคาไลน์ (Bicarbonate alkalinity) ในน้ำ ดังสมการ



การสร้างตะกอนด้วยสารส้มอาจไม่ได้ผลดีกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม ซึ่งเฟอร์ริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่า

4. พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride, PACl) เป็นสารเคมีที่มีสูตรโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นสายยาว มีสูตรโมเลกุลดังนี้ คือ $(Al_n(OH)_mCl_{3-n})_i$ เมื่อ $n=2, 2.7 \leq m \leq 3.9, i > 0$

พอลิออลูมิเนียมคลอไรด์เป็นการสร้างตะกอนที่ได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อลดปัญหาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เมื่อมีการสร้างตะกอนเกิดขึ้นคลอไรด์ไอออนที่เกิดขึ้นจะเข้าร่วมกับตะกอนและตกลงสู่ด้านล่างจึงไม่มีปัญหาสภาพเป็นกรดมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารรวมตะกอนอย่างอื่น ๆ จึงไม่มีผลเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต่าง เกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าจึงไม่เกิดปัญหาเรื่องตะกอนลอย ไม่เกิดความกระด้างถาวรเหมือนและจำนวนสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำก็ใช้น้อยกว่าด้วยดังสมการต่อไปนี้



สมบัติของพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์เมื่อเป็นการสร้างตะกอน

1. มีอำนาจในการสร้างตะกอนและการรวมตัวของตะกอนสูงและการตกตะกอนจะเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าสารส้ม

2. สะดวกในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี

3. ในการทำงานพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์จะมีช่วงความเป็นกรดต่างในการเกิดปฏิกิริยากว่าสารสร้างตะกอนตัวอื่นๆปกติจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6 ถึง 9 แต่บางกรณีจะสามารถตกตะกอนในช่วงค่าพีเอช 5 ถึง 10

4. พอลิออลูมิเนียมคลอไรด์สามารถสร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม โดยระยะเวลาในการกวนเร็วน้อยกว่า

กลไกการรวมตะกอนด้วยพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์

พอลิออลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่อยู่ในรูปของแข็งหรืออยู่ในรูปสารละลาย พอลิออลูมิเนียมคลอไรด์เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการแตกตัวได้ Al^{+3} เช่นเดียวกับสารส้มดังนั้นกลไกในการทำปฏิกิริยาจึงใกล้เคียงกับกลไกการทำปฏิกิริยาของสารส้มซึ่งอธิบายได้ดังนี้

เมื่อพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์แตกตัวจะได้ Al^{+3} ที่มีความสามารถให้ไฮโดรเจนไอออนจึงเกิดไฮโดรไลซิส ของอลูมิเนียมได้สารต่างๆ เช่น $\text{Al}_3(\text{OH})_{34}^{+5}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$ เป็นต้น ซึ่งเป็นที่มีอลูมิเนียมหลายอะตอมที่เรียกว่า Polymeric hydroxo complex ซึ่งมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ไม่เสถียรแล้วทำให้เกิดการรวมกลุ่มเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นแล้ว จึงตกตะกอน สำหรับการสร้างตะกอนค่าพีเอชของน้ำมีความสำคัญต่อประจุที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิส เนื่องจากถ้าค่าพีเอชต่ำสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกจะเกิดขึ้นมากจะทำให้เกิดผลในการเพิ่มทั้งปริมาณและอัตราเร็วในการตกตะกอน นอกจากนี้จะจับกับอนุภาคคอลลอยด์แล้วยังทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนในกลายเป็นตะกอนขนาดเล็ก เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการทำละลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นเมื่อเติมพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์ลงไปนั้นน้ำต้องผสมอย่างรวดเร็วทันทีแล้วจึงลดอัตราเร็วในการกวนช้าลงเพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสและจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้นแล้วจึงแยกตะกอนที่เกิดขึ้นออกมาโดยการปล่อยให้ตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.6.1.2 สารช่วยรวมตะกอน (Coagulation aid) (พรศักดิ์, มปป.)

พอลิเมอร์สามารถแบ่งได้อย่างกว้างๆ 2 ชนิด คือ 1. พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เจลาติน (Gelatin) และแป้ง (Starch) 2. พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ในปี ค.ศ. 1979 ได้มีการสังเคราะห์ พอลิอะครีลาไมด์ (Polyacrylamide) ขึ้น และนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง สร้างขึ้นจากโมโนเมอร์ที่รวมกันเป็นสายโซ่ยาว จำนวนโมเลกุลจะประกอบด้วยน้ำหนักโมเลกุลในปริมาณเป็นล้านหน่วย

องค์ประกอบและรูปแบบทางด้านกายภาพของพอลิเมอร์มีรูปร่างเป็นโซ่ยาว เป็นสารเคมีชนิดพิเศษ สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จากโมโนเมอร์ หลายโมโนเมอร์อันรวมกันหรือสามารถทำได้จากการเพิ่มสารเคมีลงไปเพื่อเพิ่มหน้าที่ของโมโนเมอร์ ซึ่งเป็นตัวแบ่งประเภทของพอลิเมอร์ ที่เกิดขึ้น ดังนั้นโมโนเมอร์จึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งของพอลิเมอร์แขนงของโมโนเมอร์ค่อนข้างกว้างจึงใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์พอลิเมอร์ เช่น อะครีลาไมด์ สารอินทรีย์สังเคราะห์พอลิเมอร์ สามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆคือ

1. **แคทไอออน พอลิเมอร์ (Cationic polymer)** มีประจุบวกบนส่วนของสารอินทรีย์ ระดับของประจุบนพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนไอออนของหมู่ไนโตรเจน (Nitrogen groups) มีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพตะกอนซึ่งมีประจุลบ ตัวอย่าง แคทไอออน พอลิเมอร์ เช่น Polydiallyldimethyl ammonium (PDADMA, cat-floc) สารรวมตะกอน พอลิอะครีลาไมด์ ประเภทแคทไอออน เตรียมได้โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสารเคมีชนิด นอนไอออนิกพอลิอะครีลาไมด์ หรือเป็นการรวมแคทไอออนโมโนเมอร์ด้วยพอลิอะครีลาไมด์ ชนิดแคทไอออนพอลิเมอร์จะนิยมใช้ในงานปรับสภาพตะกอน เนื่องจากของแข็งในน้ำตะกอนสดนั้นมีประจุลบ

2. **แอนไอออน พอลิเมอร์ (Anionic polymer)** มีประจุลบบนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ จำนวนประจุลบขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มของอะครีลาไมด์ ที่ละลายอยู่ในกรดอะครีลิก ชนิดของแอนไอออนพอลิเมอร์ เช่น Polyacrylamide acid (PAA), Hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) และ Polystyrene sulfate (PSS) สารรวมตะกอนพอลิอะครีลาไมด์ประเภทแอนไอออน มีประจุไฟฟ้าเป็นลบเมื่อละลายน้ำและทำให้เกิดกลุ่มแอมโมเนีย (NH_2) หรือเกิดจากการรวมกลุ่มของแอนไอออนโมโนเมอร์จนเป็น พอลิอะครีลาไมด์

3. **นอนไอออนิก พอลิเมอร์ (Nonionic polymer)** ไม่ละลายน้ำแต่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมอนุภาคของตะกอนให้เกิดการรวมกลุ่มกันได้ดี ในทางปฏิบัตินอนไอออนิกพอลิเมอร์ อาจเกิดจากการรวมกันของสารอินทรีย์

2.6.2 ฟลอคคูเลชัน (Flocculation) (พัชรินทร์, 2551)

การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ เคลื่อนที่มากระทบกันหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว กระบวนการเกิดฟลอคคูเลชัน มี 2 ลักษณะ

1. เพอริเคนเนติก ฟลอคคูเลชัน (Perikinetic flocculation) เป็นการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบตามธรรมชาติ หรือการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ถูกรบกวนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำ

2. ออร์โธเคนเนติก ฟลอคคูเลชัน (Orthokinetic flocculation) เป็นการทำให้เกิดความเร็วต่างระดับของอนุภาค เช่น การกวนน้ำ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่างกันและมีโอกาสปะทะกันและจับเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ปัจจัยในการเกิดฟลอคคูเลชันขึ้นอยู่กับค่ากำลังงานในการกวน ความหนืดของน้ำ ปริมาตรของถังกวน เวลาการกวนและชนิดของคอลลอยด์

2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการจับตัวและรวมตัวกันเป็นฟลอค

1. ค่าพีเอช

การใช้สารสร้างตะกอนที่ดี ขึ้นอยู่กับสภาพน้ำหากใส่เฟอริกคลอไรด์มากเกินไป จะทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น ทำให้อยู่ในช่วงความเป็นกรดค่าที่เหมาะสม

2. เกลือแร่ต่างๆ

ผลของไอออนชนิดต่างๆ เช่น ซัลเฟตต่อการจับตัวเป็นฟลอคทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- เปลี่ยนแปลงช่วงพีเอชที่ดีที่สุดในการเกิดฟลอค
- เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเกิดฟลอค
- ปริมาณที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนจะเปลี่ยนไป
- ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหลือในน้ำเปลี่ยนแปลงไป

3. ความขุ่น

ความขุ่นในน้ำเกิดจากเศษดินและแร่ธาตุต่างๆ ขนาด 0.002 ถึง 0.005 ลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคเหล่านี้จะตกตะกอนได้เองถ้ามีเวลามากพอ การใส่สารสร้างตะกอนช่วยทำให้เกิดฟลอคได้ง่ายและรวดเร็ว น้ำที่มีความขุ่นมากโอกาสที่คอลลอยด์จะสัมผัสกันมีมากจึงใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่น้อยกว่าที่มีความขุ่นน้อย

4. อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิลดลง ความหนืดของน้ำจะเพิ่มขึ้นอัตราการตกตะกอนของฟล็อกย่อยช้าลง เพราะแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าความเป็นกรดค่าก็เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิลดลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆย่อมลดลง

5. การกวน

เพื่อให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นในน้ำในตอนแรกจะเป็นการกวนเร็ว ในขณะที่มีการเติมสารเคมีช่วยตกตะกอน เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวในน้ำอย่างทั่วถึงและช่วยเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างอนุภาค ความขุ่นกับสารเคมีให้มากขึ้น โอกาสที่จะตัวเป็นฟล็อกก็จะเพิ่มขึ้นระยะเวลาที่จะใช้ในการกวนเร็วประมาณ 30-60 นาที

6. อัตราการเกิดฟล็อก

ในระยะแรกของการเกิดฟล็อก จะมีอนุภาคมาชนกันถี่มากเท่าใด อัตราการเกิดฟล็อกก็จะมีมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มจำนวนฟล็อกแล้วยังเพิ่มน้ำหนักและขนาดฟล็อกอีกด้วย ทำให้จมน้ำได้ง่ายขึ้นปัญหานี้แก้ไขได้โดยนำตะกอนที่ตกแล้วส่วนหนึ่งหมุนเวียนกลับมาใช้เพื่อเพิ่มโอกาสที่อนุภาคและฟล็อกจะชนกันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถึงตะกอนแบบโซลิดซ์คอนแทกที่ใช้หลักการนี้

2.7 โอโซน (Ozone)

2.7.1 สมบัติของโอโซน (สุรพล, 2543)

โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุล คือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 กรัมต่อโมล จัดเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ มีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่นคาวปลา โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่มีสี แต่ถ้ามีความเข้มข้นที่สูงจะมีสีน้ำเงิน โอโซน เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงตัวหนึ่ง มีศักย์ออกซิเดชันเท่ากับ 2.07 โวลท์ ซึ่งสูงกว่าคลอรีน 1.52 เท่า โดยโอโซนมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ สารละลายและในอากาศ มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยโอโซนทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ สมบัติทางกายภาพของ โอโซนแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สมบัติทางกายภาพของโอโซน (พรวิษาและคณะ, 2551)

จุดเดือด (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ)	-111.9 °C
จุดหลอมเหลว (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ)	-192.7 °C
อุณหภูมิวิกฤติ	-12.1°C
ปริมาตรวิกฤติ	0.147 L/mol
ความดันวิกฤติ	54.6 atm
ความหนาแน่น (ก๊าซที่ 0 °C)	2.144 g/L
ความหนาแน่น (ของเหลวที่ -183°C)	1.57 g/cm ³
ความตึงผิว (ที่ -183°C)	38.4 Dyne/cm
ความหนืด (ของเหลวที่ -183°C)	1.55 centipoint
เอนทาลปีของการระเหย (-122°C)	75.6 Cal/g
ความสามารถดูดกลืนรังสียูวีได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น	254 nm

2.7.2 การเกิดโอโซน

โอโซนเกิดตามธรรมชาติได้ 2 แบบ คือ

1. ปรากฏการณ์จากแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 2400 อังสตรอม ทำให้ออกซิเจน (O₂) ที่ได้รับรังสีในช่วงดังกล่าวแตกตัวออกเป็นอะตอมของออกซิเจน (O[°]) และไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ ๆ เกิดเป็นก๊าซโอโซน

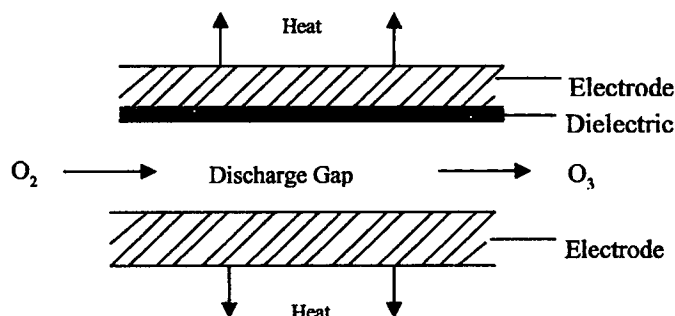
2. โครนาดิสชาร์จ (Corona discharge) เกิดในเวลาที่ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า ขณะฝนตก ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงมาก ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจนและไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ เกิดเป็นก๊าซโอโซน

กระบวนการผลิตโอโซนในอุตสาหกรรมมี 3 แบบ คือ

1. วิธีอัลตราไวโอเล็ต (UV method) เป็นการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ลงบนก๊าซออกซิเจน โดยใช้หลอดยูวี ขนาด 40 วัตต์ ซึ่งสามารถผลิตโอโซนได้ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

2. วิธีโครนาดิสชาร์จ (Corona discharge) วิธีนี้ทำได้โดยผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ เข้าไปในช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000 – 22,000 โวลต์ ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจน บางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน โดยการวิ่งชนของ

อิเล็กตรอน จากนั้นอะตอมของออกซิเจน จะรวมตัวกับ โมเลกุลของออกซิเจน กลายเป็น โอโซนแสดง ดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดีสชาร์จ

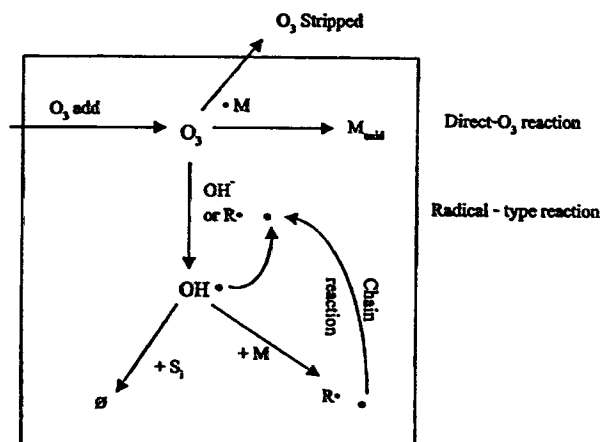
3. วิธีโคลดพลาสมา (Cold plasma method) เป็นการฉายแสงพลาสมาลงบนออกซิเจน โดยใช้แท่งแก้ว 2 แท่งที่บรรจุก๊าซเฉื่อยแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงลงบนแท่งแก้วทั้งสอง เพื่อให้ทำให้เกิดสนามพลาสมา วิธีนี้สามารถผลิตโอโซนได้ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

วิธีการผลิตโอโซนในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องผลิตโอโซนที่อาศัยหลักการของวิธีโคโรนาดีสชาร์จ โดยใช้อากาศอัดเป็นวัตถุดิบในการผลิตโอโซน

2.7.3 ปฏิกริยาของโอโซนเนชั่น

โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic organic) ส่วนมากได้ดี และผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาส่วนมากจะมีพิษน้อยลง และถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ ค่าพลังงานอิสระ (Free energy) ของโอโซนมีค่าถึง -400 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาออกซิไดซ์โดยโอโซนจะดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ ข้อเสียคือโอโซนสลายตัวให้ออกซิเจน (O_2) ได้เร็วมากในบรรยากาศ จึงต้องผลิตที่แหล่งบำบัด (On-site) โดยตรง

ปฏิกิริยาของโอโซนที่กระทำต่อสารอินทรีย์มี 2 แบบ คือ โมเลกุลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์โดยตรง (Direct) และโดยทางอ้อม (Indirect) ซึ่งโอโซนแตกตัวเป็นแรดิคัลที่ว่องไวต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2-6

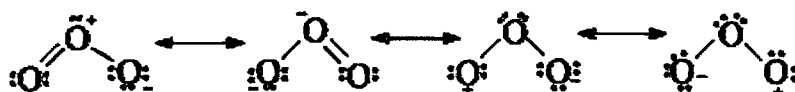


โดยที่ R = free radicals which catalyze the ozone decomposition
 M = Solute
 M_{ox} = Oxidized solute
 S₁ = free radical Scavenger i
 σ = products which do not catalyze the ozone decomposition

รูปที่ 2-6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการ โอโซนชั้นทั้งทางตรงและทางอ้อม (Gottschalk *et al.*,2000)

2.7.3.1 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง (Direct Oxidation)

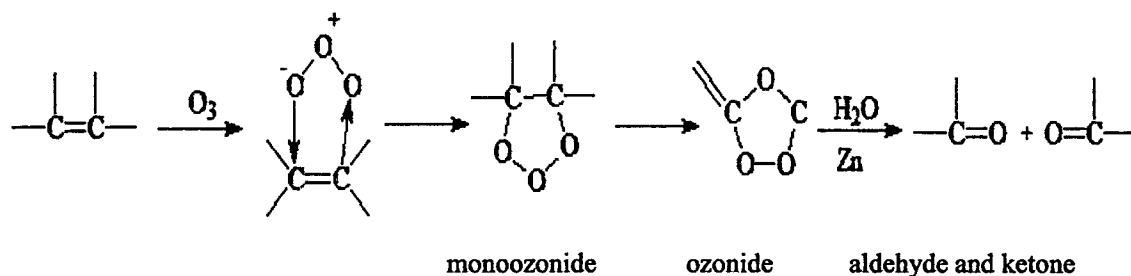
โมเลกุลของโอโซน (O₃) ไม่เป็นเส้นตรง มีพันธะระหว่างออกซิเจน 2 พันธะทำมุมระหว่าง พันธะ 116° 45' ความยาวพันธะทั้งสองเท่ากันคือ 1.278 °A π อิเล็กตรอนเกิดเรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลของโอโซน

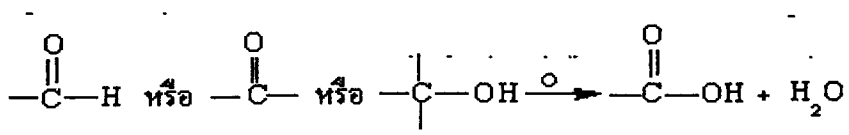
π อิเล็กตรอนจะถูกใช้ร่วมกันระหว่างออกซิเจนทั้ง 3 อะตอมจากโครงสร้างนี้จะเห็นได้ว่าโอโซนมีอิเล็กตรอนมากเกินพอ และเป็นโมเลกุลมีขั้วจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงแบบ Dipole- mediat attack หรือแบบ Electrophilic attack

1. Dipole - mediate attack โอโซนจะหันด้านขั้วลบของโมเลกุลเข้าหาพันธะคู่ของสารอินทรีย์ เกิด intermediate เป็น โมโนโอโซนไนต์และโอโซนไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole - mediat attack

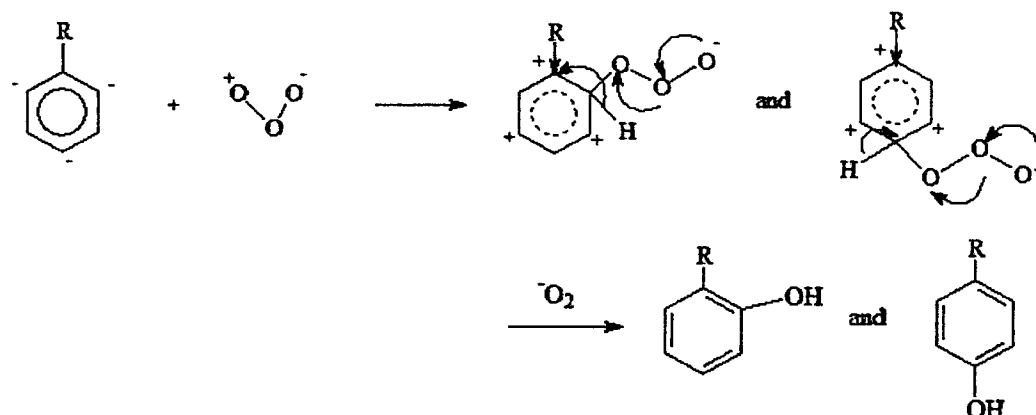
จากนั้นสลายตัวให้อัลดีไฮด์และคีโตน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนอัลดีไฮด์หรือคีโตนที่เกิดขึ้น รวมทั้งสารพวกแอลกอฮอล์จะถูกโอโซนออกซิไดซ์ต่อไปได้ กรดคาร์บอกซิลิกและน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 การสลายตัวของอัลดีไฮด์และคีโตนด้วยก๊าซโอโซน

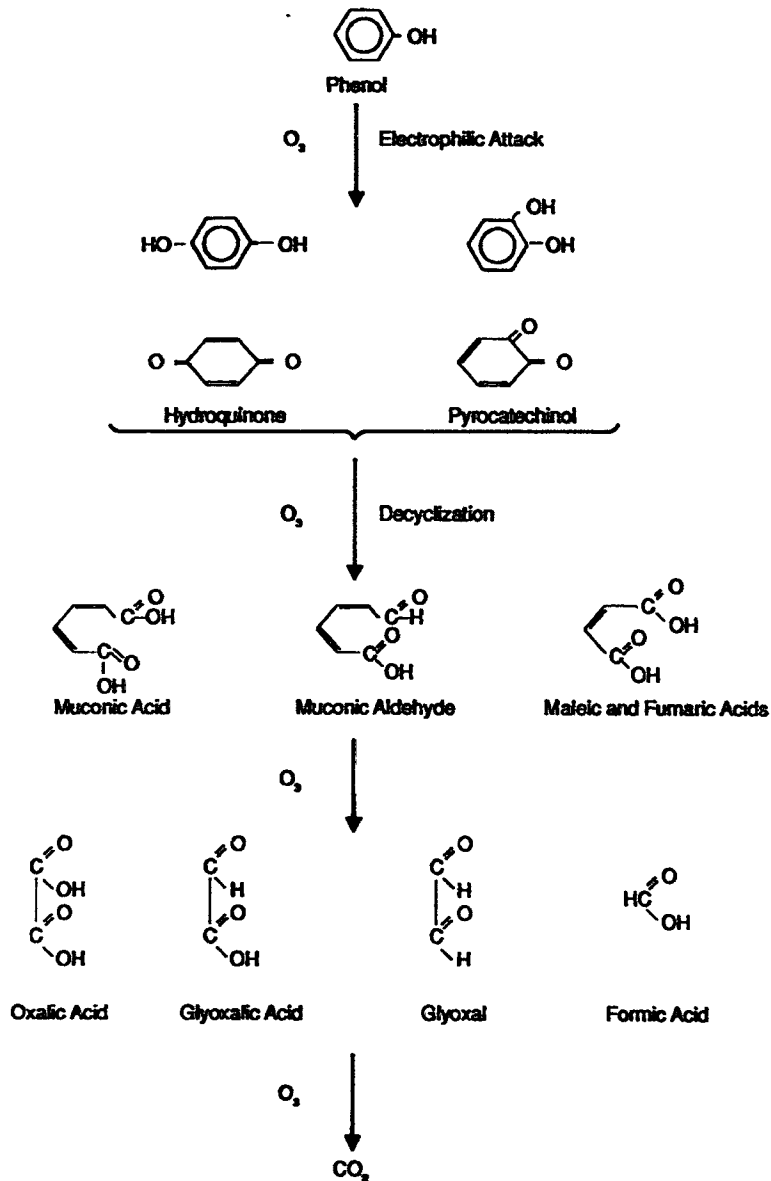
2. Electrophilic attack โอโซนสามารถทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ (Electrophile)

โดยหันด้านบวกของโมเลกุลเข้าหาบริเวณที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นของโมเลกุลสารอินทรีย์พวกอะโรมาติก ซึ่งความว่องไวของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับหมู่แทนที่ในวงเบนซีน (Benzene ring) ว่าเป็นหมู่ที่ให้อิเล็กตรอน $-\text{OCH}_3$, $-\text{CH}_3$ และ $-\text{NO}_2$ ปฏิกิริยาจะว่องไวขึ้น ถ้าวงเบนซีนมีหมู่แทนที่เป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอน (electron withdrawing group) เช่น $-\text{COCH}_3$, $-\text{COOC}_2\text{H}_5$, $-\text{Cl}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ จะทำให้ความว่องไวของปฏิกิริยาแทนที่ Electrophile ในวงเบนซีนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Electrophilic attack

การทำปฏิกิริยาโดยตรงจะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์ที่มีตำแหน่งเฉพาะเจาะจงหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่โอโซนสามารถออกซิไดซ์ได้ ถ้าเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว และ Halogenated aliphatic compound โมเลกุลของโอโซนไม่สามารถออกซิไดซ์สารพวกนี้ได้ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับฟีนอลแบบ Electrophilic attack แสดงในรูป 2-11



รูปที่ 2-11 ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของ โอโซนกับฟีนอลแบบ Electrophilic attack

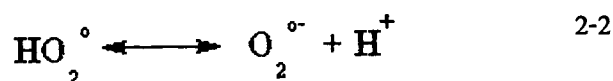
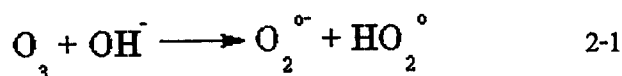
(Langlais *et al.*, 1991)

2.7.3.2 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเกิดผ่านแรดิคัล (Radical Mediate Oxidation)

การเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมเกี่ยวข้องกับแรดิคัล มีความซับซ้อน โดยขั้นแรกจะเกิดการสลายตัวของก๊าซโอโซน โดยถูกเร่งด้วยไฮดรอกซิลไอออนเพื่อให้เกิดเป็นตัวออกซิเดนต์ เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทันทีกับสารอินทรีย์ กลไกการเกิดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

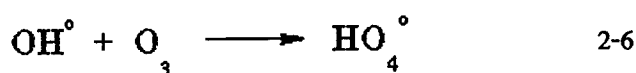
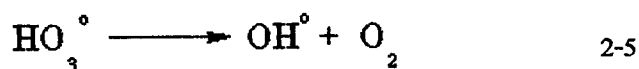
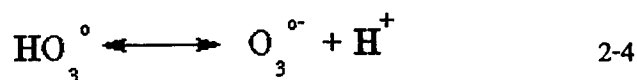
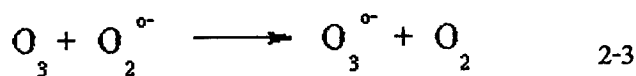
1. ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation step)

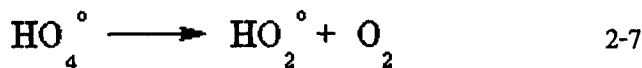
ปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลไอออนกับก๊าซโอโซนทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไฮดรอกซิลแรดิคัล (Superoxide Anion, $O_2^{\circ-}$) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (Hydroperoxide Radical, HO_2°) ดังสมการที่ 2-1 ไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัลอยู่ในสมดุล กรด-เบส ดังสมการที่ 2-2



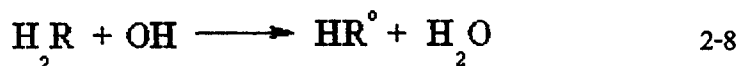
2. ขั้นตอนลูกโซ่แรดิคัล (Radical chain step)

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไฮดรอกซิลแรดิคัล ทำให้เกิดโอโซนไนด์แอนไอออนแรดิคัล (Ozonide Anion Radical, $O_3^{\circ-}$) ซึ่งจะสลายตัวทันทีเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ดังสมการที่ 2-3, 2-4 และ 2-5 ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโอโซนดังสมการที่ 2-6 และ 2-7

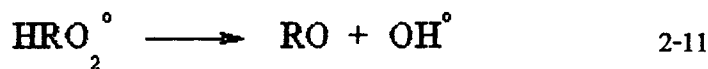
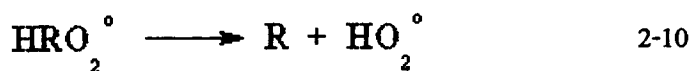




การสลายตัวของไฮโดรเตตระออกไซด์เรดิคัล (Hydrotetraoxide Radical, HO_4°) ไปเป็นออกซิเจนและไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล จะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งสารใดก็ตามที่สามารถเปลี่ยนไฮดรอกซิลเรดิคัล ไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัลหรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ใหม่อีกครั้ง (Chain carrier) จะถูกเรียกว่า ตัวกระตุ้น (Promoter) โมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้และบางตัวของสารอินทรีย์จะมีกลุ่มฟังก์ชันซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลและทำให้เกิดเรดิคัลของสารอินทรีย์ (R°) ดังสมการที่ 2-8



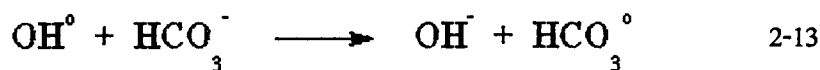
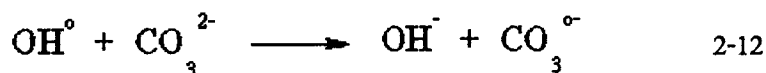
ถ้ามีออกซิเจนอยู่ในระบบสามารถเกิดออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Organic Peroxy Radical, ROO°) ได้ ดังสมการที่ 2-9, 2-10 และ 2-11



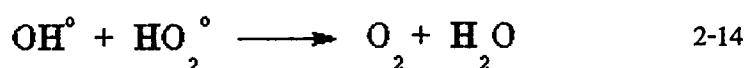
การสลายตัวของไฮดรอกซิลเรดิคัลเริ่มต้นโดยไฮดรอกไซด์ไอออน นำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่และผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วแสดงถึงไฮดรอกซิลเรดิคัลมีครึ่งชีวิต (Half-Life) ที่สั้นมากๆ เช่น น้อยกว่า 10 ไมโครวินาที (μs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10^{-4} โมลาร์

3. ขั้นตอนสุดท้าย (Terminal step)

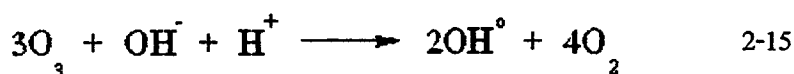
สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางตัว สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล ทำให้เกิดเรดิคัลลำดับที่สอง (Secondary Radical) ซึ่งไม่สร้างซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัลหรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล จะเรียกสารเหล่านี้ว่าตัวยับยั้ง (Inhibitor/ Scavenger) ซึ่งสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่และยับยั้งการสลายตัวของไฮดรอกไซด์ไอออนได้ ดังสมการที่ 2-12 และ 2-13



ความเป็นไปได้อื่นที่จะหยุดปฏิกิริยาถูกโซ่ คือ การทำปฏิกิริยากันของ แรดิคอลสองตัว ดังสมการที่ 2-14



เมื่อรวมสมการทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่า 3 โมเลกุลของโอโซนจะให้ 2 โมเลกุลของไฮดรอกซิลแรดิคอล ดังสมการที่ 2.15



2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนชั้น (Gottschalk *et al.*, 2000)

1. ค่าพีเอช

โอโซนสามารถบำบัดน้ำเสียที่ค่าพีเอช 2-8 สถานะ คือที่ค่าพีเอชเป็นกรด โอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ แต่ในพีเอชที่เป็นเบส โอโซนจะแตกตัวให้เป็นแรดิคอลซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าพีเอชเป็นกรด

2. ค่าอัลคาไลน์ตี

น้ำเสียที่มีไอออนของ HCO_3^- และ CO_3^{2-} จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากไอออนดังกล่าวสามารถดักจับ OH° ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าหรือสิ้นสุดลง

3. อุณหภูมิ

โอโซนละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โอโซนละลายน้ำได้น้อยลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง จะทำให้โอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจนได้รวดเร็ว แต่การเกิดแรดิคอล อุณหภูมิที่สูง จะทำให้อัตราการแตกตัวของ โอโซนเป็นแรดิคอล เพิ่มมากขึ้น

4. ปริมาณ โอโซน

ปริมาณของก๊าซโอโซนที่ ป้อนเข้าไปในระบบ ถ้ามีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมากทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซโอโซนก็มีมากขึ้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tanaka *et al.* (2002) การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ถือเป็นวิธีที่นิยมในการใช้กำจัดพวกสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ในการทดลองครั้งนี้ได้พัฒนาระบบเพื่อออกแบบให้สามารถใช้น้ำบำบัดน้ำเสียจากโรงงานปศุสัตว์ โดยน้ำเสียจากโรงปศุสัตว์ถูกส่งเข้าระบบยูเอเอสบีเพื่อบำบัดคุณภาพน้ำและผลิตก๊าซชีวภาพ จากนั้นจึงนำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดส่งเข้าสกรับเบอร์เพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกลิ่นและเกิดการกัดกร่อนของบอยเลอร์นอกจากนี้สกรับเบอร์และกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยเมื่อผสมมีเทนกับอากาศในอัตราส่วน 1 : 3 ผ่านใน สกรับเบอร์แบบที่เรียจำพวกมีเทนออกซิไดซ์จึงจะสามารถเจริญเติบโตทั่วทั้งผิวหน้าตัวกลาง ซึ่งสามารถดูดซึมแอม โมเนียมและฟอสเฟตถือเป็นการลดปริมาณสารอาหารลง ส่วนแบคทีเรียจำพวก เมทาโนโทปิก (Methaotrophic) ซึ่งมี Methane monooxygenases (MMO) เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลี่ยนมีเทนไปเป็นเมทานอลและเอโนไซม์ตัวนี้ยังสามารถจับกับพวกสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเสีย ซึ่งมีสีน้ำเข้ม ทำให้ช่วยลดความเข้มของสีและปัญหาข้อเรียกร้องเรียนอันเกิดจากการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

Pana *et al.* (2003) ศึกษากระบวนการออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียกากส่าและออกแบบการทดลองเป็นแบบครึ่ง ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณของโอโซนและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการกำจัดสี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถกำจัดสีได้ถึง 71-93 เปอร์เซ็นต์และซีไอดี 15-25 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แต่ค่าที่โอซีไม่เปลี่ยนแปลง จากการศึกษาสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ในน้ำเสียดิบพบว่า สารที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลคือ เมลานอยดิน (Melanoidin) จากการทดลองพบว่ากระบวนการ โอโซนชันสามารถลดสารประกอบนี้ได้ และทำให้สีมีค่าลดลงเนื่องจากกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore group) ได้ถูกทำลายโดยก๊าซโอโซน จากการทดลองการบำบัดเมลานอยดินสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ โอโซนชันพบว่ามีความไวเหมือนกันกับ น้ำเสียกากส่า จากการทดลองได้แนะนำปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ โอโซนชันที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและทีโอซี เช่น ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตไอออนหรือการเติมตัวเร่ง

Coca *et al.* (2005) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพโอโซนชันของน้ำเสียดิบจากกากส่าจากกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ ทำการทดลองเป็นแบบครึ่ง ปัจจัยที่วิเคราะห์คือ ค่าพีเอช ไบคาร์บอเนต ไอออน อุณหภูมิและอัตราการกวนผสม ที่มีผลต่อสีและการกำจัดสารอินทรีย์ จากการทดลองพบว่าหากไม่สนใจค่าพีเอช จะพบว่าปฏิกิริยาทางตรง (Direct reaction) ของโอโซนต่อน้ำเสีย

อินทรีย์ มีอิทธิพลมากกว่าปฏิกิริยาที่เกิดผ่านแรดิคอล (Radical reaction) การกำจัดไบคาร์บอเนต ไอออนซึ่งเป็นตัวช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดผ่านแรดิคอล ทำให้มีประสิทธิภาพในการลดสีและซีโอดี การทำให้เป็นกรด (Acidification) สำหรับการกำจัดไบคาร์บอเนต ไอออน เป็นการเปลี่ยนสารประกอบที่ทำให้เกิดสีมีขนาดน้ำหนักโมเลกุลที่เล็กลง อุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในกำจัดสีและค่าซีโอดี คือ 40 องศาเซลเซียส สามารถลดได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และ 37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อัตราเร็วการกวนผสมทำให้ผลที่ดีกว่าเนื่องจากไอโซเนชันในขั้นแรกจะเป็นปฏิกิริยาเริ่มต้น ซึ่งไอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโครงสร้างโมเลกุลของอะโรมาติกหรือโอเลฟินิกของสารที่ทำให้เกิดสี

Chaudhari et al. (2006) ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีและค่าซีโอดีจากน้ำเสียจากน้ำตาลจากโรงงานผลิตแอลกอฮอล์ที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการทางชีวภาพแล้ว ใช้สารรวมตะกอนคือ เฟอร์ริกคลอไรด์ อลูมิเนียมคลอไรด์ และพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ ผลการรวมตะกอนทางเคมีพบว่าการลดค่าซีโอดีและสีโดยใช้ 60 มิลลิโมลต่อลิตรของอลูมิเนียมคลอไรด์ 60 มิลลิโมลต่อลิตรของเฟอร์ริกคลอไรด์ และ 30 มิลลิโมลต่อลิตรของพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ ลดได้ประมาณ 55, 60 และ 72% ในการลดค่าซีโอดี ตามลำดับ และการลดสีได้ 83, 86, และ 92% ตามลำดับ ค่าพีเอชมีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอน พบว่าที่ค่าพีเอช 5.5 มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการรวมตะกอนด้วยพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ และพบว่าตะกอนแห้งที่ได้จากการรวมตะกอนของพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ให้ค่าพลังงาน 13.4 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งอาจใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานขนาดกลางได้ ในน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีสูงๆ ได้แนะนำให้ใช้พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ในการสร้างและรวมตะกอนเนื่องจากมีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด

Satyawali et al. (2007) ศึกษาน้ำเสียจากกากน้ำตาลพบว่ามีความเป็นพิษมากที่สุดอีกปัญหาหนึ่ง ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยการศึกษาจะมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกันทั้งที่อาศัยออกซิเจนและไม่อาศัยออกซิเจนต่างก็เป็นวิธีที่ดีสำหรับการบำบัดน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียโดยไม่อาศัยออกซิเจนที่มีค่าซีโอดี 80,000-100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร บีโอดี 40,000-50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงต่ำ สามารถบำบัดบีโอดีได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงยังสามารถได้พลังงานกลับคืนมาในรูปของก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้การบำบัดยังสามารถลดกากอินทรีย์และสีต่างๆ ได้ด้วย นอกจากนี้ความก้าวหน้าทางชีววิทยาและวิธีทางเคมียังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่มาจากกากน้ำตาล

Liang et al. (2009) การรวมตะกอนทางเคมีถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกากน้ำตาล ในการทดลองแบบครึ่งได้แปรค่าตัวแปรที่สำคัญคือ ชนิดของสารรวมตะกอน ปริมาณของสารรวมตะกอนที่ใช้ ค่าพีเอช อัตราเร็วในการกวน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเฟอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพมากที่สุดในกำจัดสีและซีโอดีสูงสุดคือ 89% และ 98% ตามลำดับ ในขณะที่อลูมิเนียมซัลเฟตได้ 66% และ 86% ตามลำดับ การรวมตะกอนทางเคมีพบว่าที่

พีเอชสูงมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนได้ดีกว่าพีเอชต่ำ อัตราเร็วในการกวนช้าทำให้เกิดกลุ่มของตะกอนที่ดีกว่า การใช้สารช่วยรวมตะกอนพบว่าสารพอลิอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เล็กน้อย แต่ในทางกลับกัน พอลิอะครีลาไมด์ แคทไอออน เพิ่มประสิทธิภาพการจับตัวเป็นกลุ่มตะกอน

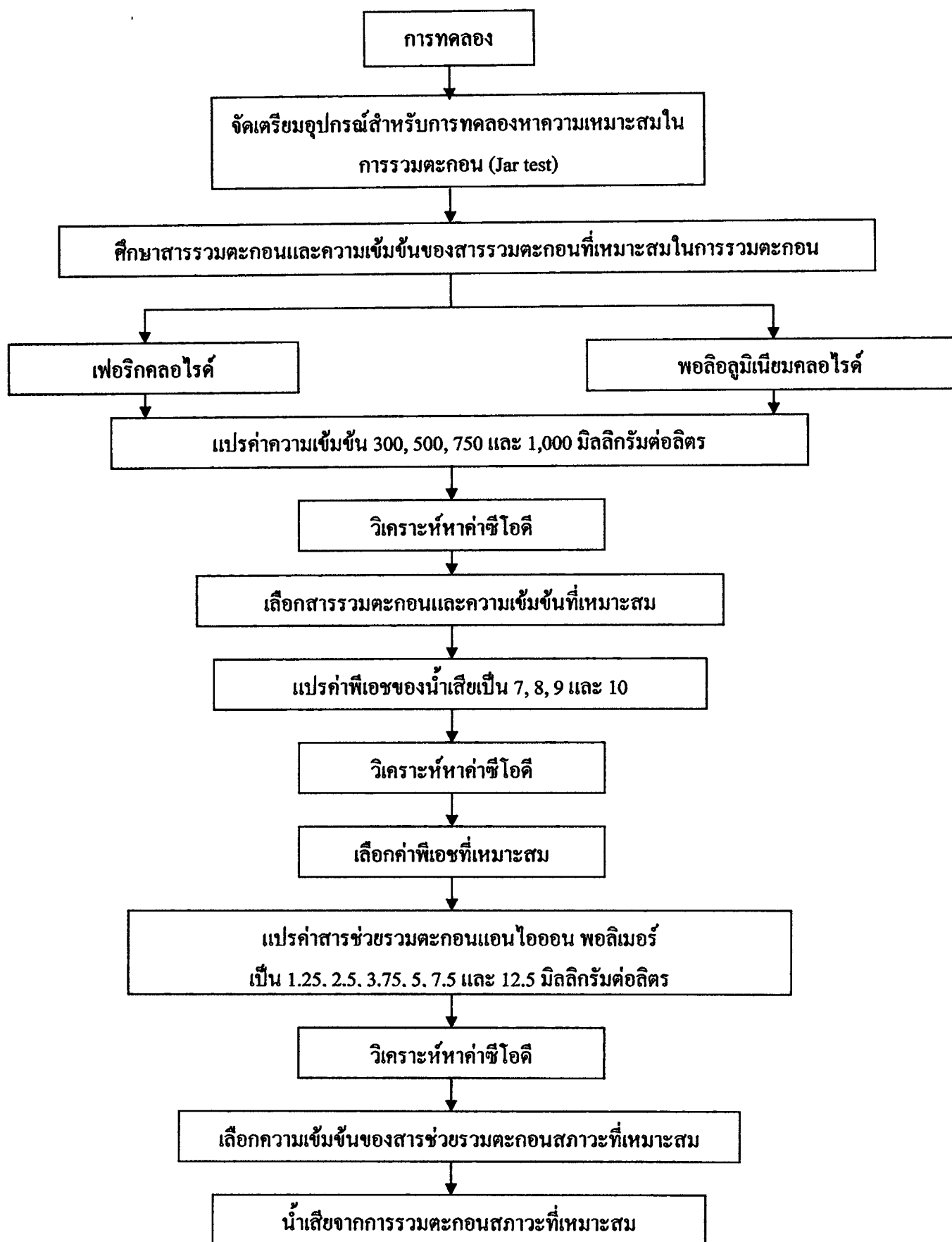
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

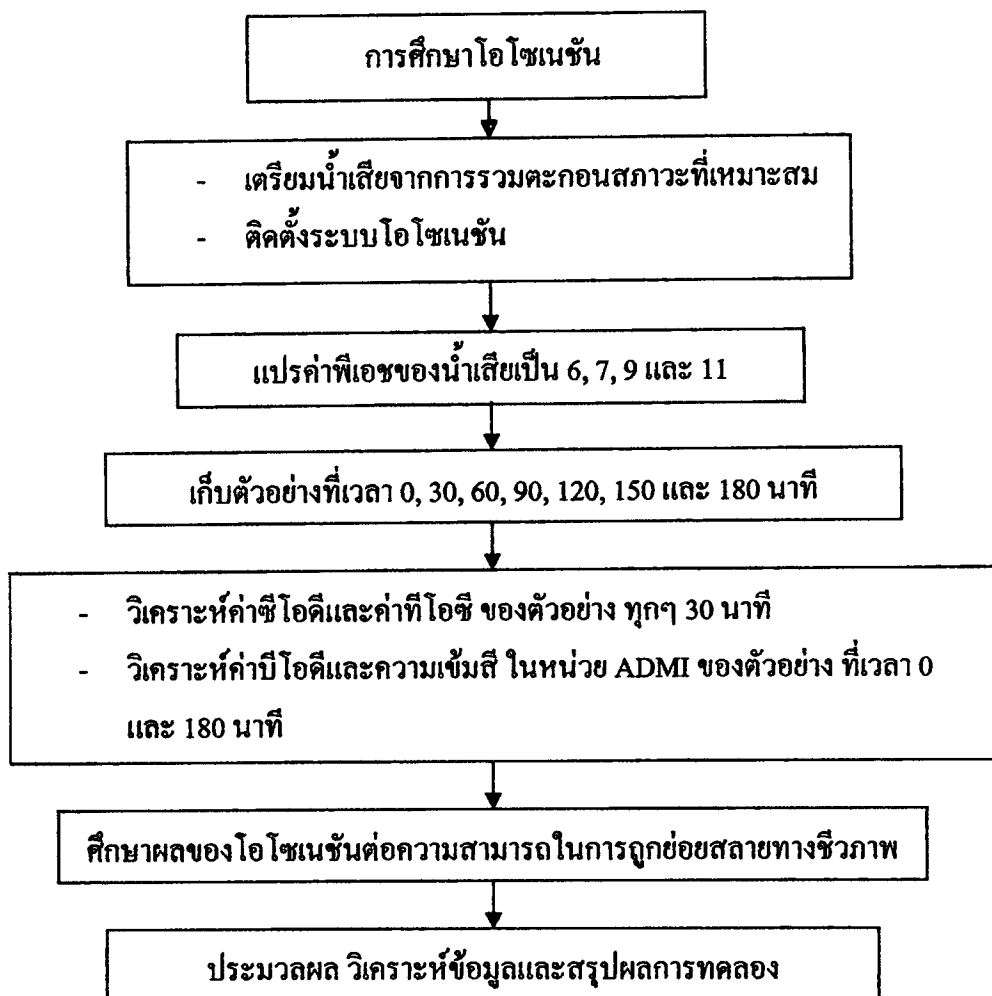
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone generator) บริษัท พี.เอส.ซี.เทรคดิงแอนคัลติเวล ลีออปเม้นท์ จำกัด ประเทศไทย
2. ถังปฏิกิริยา (Reactor) และ หัวกระจายก๊าซ (Gas diffuser)
3. ถังบรรจุอากาศอัด (Compressed air) มีก๊าซออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ 21 %
4. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) บริษัท เจ ซัมมิท จำกัด รุ่น Solida ประเทศไทย
5. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) บริษัท Metrohm swiss made รุ่น 827 pH Lab ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
6. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) บริษัท TG Instrument รุ่น T60 ประเทศอังกฤษ
7. เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลาย (DO meter) บริษัท YSI รุ่น YSI 52 ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. ตู้บ่ม (Incubator) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 °C บริษัท Velp scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. ตู้อบ (Oven) บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ (TOC analyzer) บริษัท Shimadzu รุ่น TOC- VCPH ประเทศญี่ปุ่น
11. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels)
12. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง และเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
13. ขวดบีโอดีพร้อมจุก ขนาดมาตรฐาน 300 มิลลิลิตร
14. เครื่องแก้วต่าง ๆ



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมี

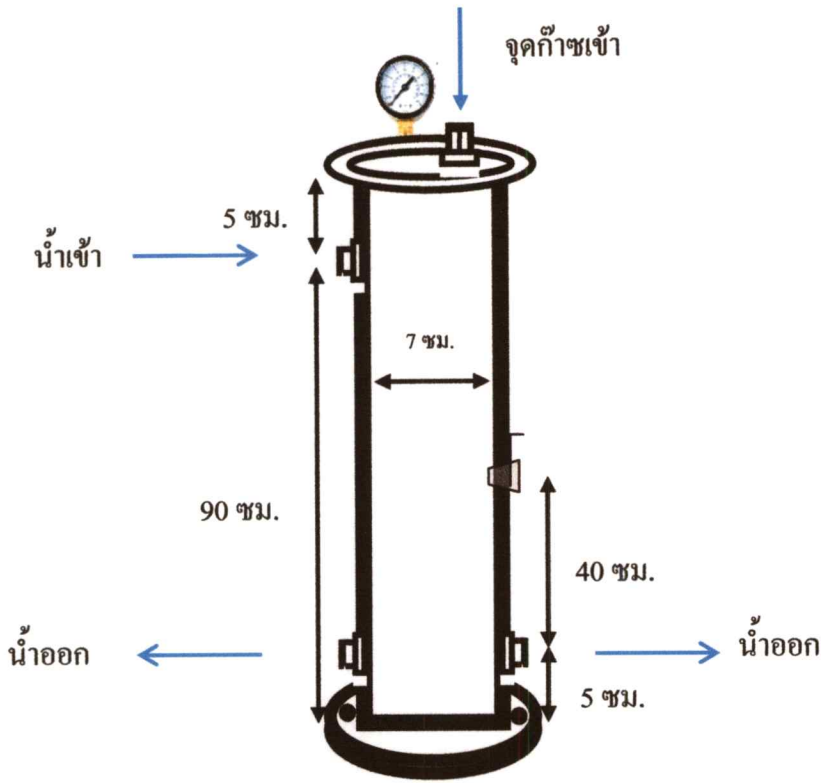


รูปที่ 3-2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการศึกษาไอโซเนชั่นที่มีผลต่อน้ำเสียจากค้ำ

3.2.1 การติดตั้งและเดินระบบไอโซเนชั่น

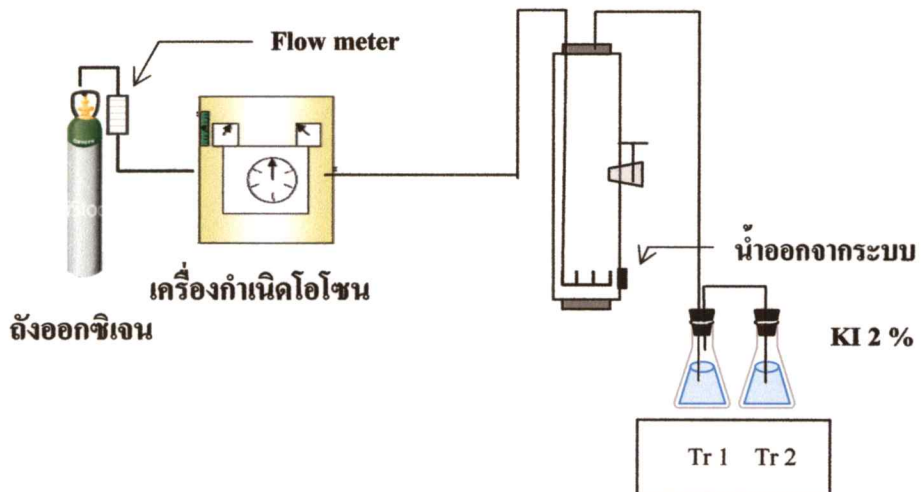
1. ถังปฏิกริยา

ถังปฏิกริยาทำจากอะคริลิก (หุ้มด้วยฟอยด์เพื่อป้องกันแสงยูวีทำปฏิกริยากับก๊าซไอโซนภายในถัง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 95 เซนติเมตร ปริมาตรของเหลว 3,654 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีจุดเก็บตัวอย่างอยู่สูงจากก้นถัง 45 เซนติเมตร แสดงดังในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 รายละเอียดแบบจำลองถังปฏิกรณ์

การติดตั้งถังปฏิกรณ์โดยให้ก๊าซไอโซนเข้าทางด้านบนของระบบ โดยผ่านหัวกระจายก๊าซ (Gas diffuser) ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของถัง และใช้สายยางซิลิโคนที่ทนต่อการทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซน โดยมีเกววัดความดันติดตั้งบริเวณด้านบนเพื่อวัดความดันภายในถังปฏิกรณ์ และจุดระบายก๊าซไอโซนเพื่อป้องกันความดันที่เกิดขึ้นภายในถัง รูปแบบการติดตั้งและการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 การติดตั้งระบบไอโซนชัน

2. การเดินระบบโอโซนชั้น

ในการทดลองได้ทำการเดินระบบแบบครั้ง (Batch mode) โดยเติมน้ำเสียด่างที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนที่เหมาะสมแล้วปริมาตร 2 ลิตร เข้าไปในถังปฏิกรณ์ แล้วติดตั้งระบบโอโซนชั้น เริ่มจากการนำอากาศอัดที่มีก๊าซออกซิเจนผ่านเข้าสู่เครื่องกำเนิดโอโซน ซึ่งควบคุมปริมาณอากาศอัดที่เข้าสู่ระบบด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) รวมถึงควบคุมปริมาณการใช้ก๊าซโอโซนต่อการทดลองในแต่ละครั้ง ก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้น จะถูกส่งต่อเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผ่านหัวกระจายก๊าซ (Gas diffuser) ที่อยู่บริเวณด้านล่างถัง ก๊าซโอโซนมีลักษณะเป็นฟองอากาศจะไหลขึ้นไปสู่ด้านบน และสัมผัสกับน้ำเสียด่างได้แรงดันภายในถังซึ่งเป็นระบบปิด ทำให้เกิดการกวนผสมกันภายใน โดยสามารถเก็บตัวอย่างได้ที่จุดน้ำออกจากระบบตามระยะเวลาที่ต้องการ และปริมาณก๊าซโอโซนที่ออกจากระบบถูกคักจับด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (KI 2%) ที่ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เพื่อป้องกันอันตรายจากก๊าซโอโซน และใช้ในการทดสอบปริมาณก๊าซโอโซนที่เหลือจากปฏิกรณ์ เพื่อคำนวณปริมาณก๊าซโอโซนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาได้

3.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียด่างที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.2.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมี

3.2.3.1 ศึกษาสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของสารรวมตะกอนที่เหมาะสมในการรวมตะกอน

1. จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองหาความเหมาะสมในการรวมตะกอน (Jar test)
2. เตรียมสารรวมตะกอน คือ เฟอริกคลอไรด์และพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมลงในน้ำเสียที่มีปริมาตร 400 มิลลิลิตร
3. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที
4. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
5. ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
6. นำน้ำส่วนบนไปวัดค่าซีไอดี
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 6 แต่เปลี่ยนค่าความเข้มข้นเป็น 500, 750 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.2.3.2 ศึกษาค่าพีเอชของสารรวมตะกอนที่เหมาะสมในการรวมตะกอน

1. จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองหาความเหมาะสมในการรวมตะกอน (Jar test)
2. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย แปรค่าที่ 7, 8, 9 และ 10 โดยปรับด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล ใช้ความเข้มข้นของสารรวมตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.1 ในน้ำเสียที่มีปริมาตร 400 มิลลิลิตร

3. ทำตามขั้นตอน 3.2.3.1 ข้อ 3-6

3.2.3.3 ศึกษาความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนที่เหมาะสมในการรวมตะกอน

1. จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองหาความเหมาะสมในการรวมตะกอน (Jar test)
2. เตรียมสารช่วยรวมตะกอน คือ แอนไอออน พอลิเมอร์
3. เลือกสารรวมตะกอนและค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.1 และใช้ความเข้มข้นของสารรวมตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.2 ลงในน้ำเสียที่มีปริมาตร 400 มิลลิลิตร

4. ปั่นกวนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที เติมแอนไอออน พอลิเมอร์ที่ความเข้มข้น 1.25, 2.5, 3.75, 5, 7.5 และ 12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในน้ำเสีย

5. ทำตามขั้นตอน 3.2.3.1 ข้อ 3-6

3.2.4 การศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนด้วยโอโซนชั้น

1. จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3-4
2. นำน้ำเสียที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีที่เหมาะสม ปริมาณ 2 ลิตร ปรับค่าพีเอชให้ได้เท่ากับ 6 ใส่ในถังปฏิกิริยา และสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (KI 2%) 1000 มิลลิลิตร ใน Tr1 และ Tr2
3. วัดค่าซีไอดีและทีไอซีของน้ำเสียเริ่มต้น
4. เปิดเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศอัดที่ 5 ลิตรต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที จนครบ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าซีไอดีและทีไอซี
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 5 แต่เปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 7, 9 และ 11 ตามลำดับ

3.2.5 การศึกษาผลของโอโซนชั้นต่อความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพและความเข้มข้นในหน่วย ADMI

1. จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3-4
2. นำน้ำเสียที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีที่เหมาะสมที่ ปริมาณ 2 ลิตร ปรับค่าพีเอชให้ได้เท่ากับ 6 ใส่ในถังปฏิกรณ์ และสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (KI 2%) 1000 มิลลิลิตร ใน Tr1 และ Tr2
3. วัดค่าบีโอดี ซีโอดี และความเข้มข้นในหน่วย ADMI ของน้ำเสียเริ่มต้น
4. เปิดเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศอัดที่ 5 ลิตรต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างเมื่อครบ 3 ชั่วโมง นำไปวัดค่าบีโอดี ซีโอดี และความเข้มข้นในหน่วย ADMI
6. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี เริ่มต้นและเมื่อผ่าน โอโซนชั้น
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 6 แต่เปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 7, 9 และ 11 ตามลำดับ

3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์และมีวิธีการวิเคราะห์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์	หมายเหตุ
ปริมาณ โอโซน	Iodometry	APHA (2005) Part 2350 E
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Closed reflux	APHA (2005) Part 5220 C
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	DO meter	APHA (2005) Part 5210 B
pH	pH meter	-
ความเข้มข้น (ADMI)	UV-Visible spectrophotometry	APHA (2005) Part 2120 F
TOC (มิลลิกรัมต่อลิตร)	TOC analyzer	APHA (2005) Part 5310
Alkalinity (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของ CaCO ₃)	Titration	APHA (2005) Part 2320 B

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากลำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือน้ำทิ้งจากลำจากโรงงานผลิตเอทานอลที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพ พบว่าน้ำเสียมีสีน้ำตาลเข้มและมีกลิ่นที่แรง เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4-1 พบว่าค่าสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีมีค่าสูงถึง 44,800 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าสารอินทรีย์คาร์บอนมีค่า 9,116 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อพิจารณาสารอินทรีย์ในรูปค่าบีไอดีมีค่า 4,700 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่า BOD₅/COD มีค่าเท่ากับ 0.1050 แสดงให้เห็นว่า มีสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก

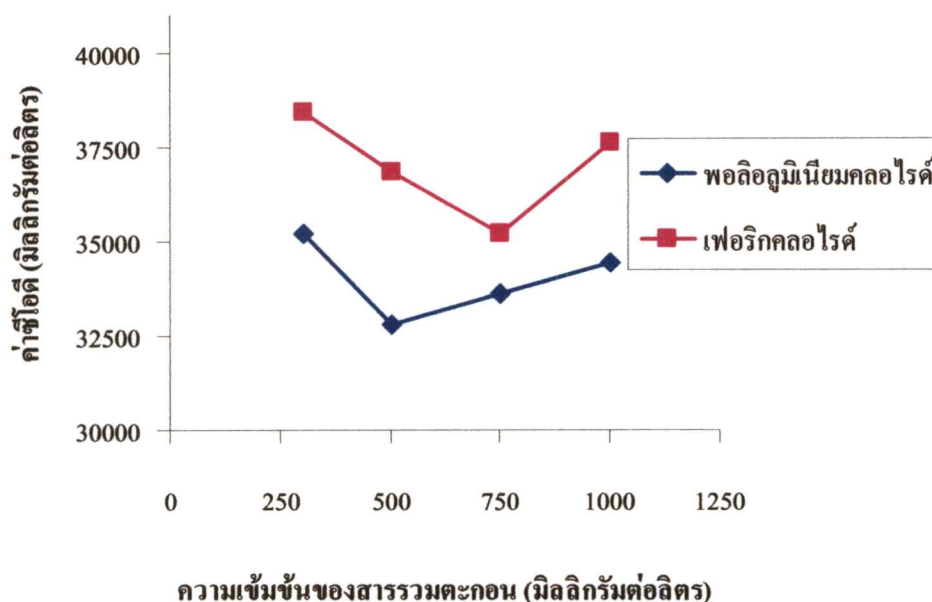
ตารางที่ 4 -1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากลำที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้จากการตรวจวัดเริ่มต้น
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	44,800
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4,700
TOC (มิลลิกรัมต่อลิตร)	9,116
อนินทรีย์คาร์บอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,621
ความเข้มข้นในหน่วย ADMI	157,563
pH	8.5 – 8.8
Alkalinity (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของ CaCO ₃)	8,500

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมี

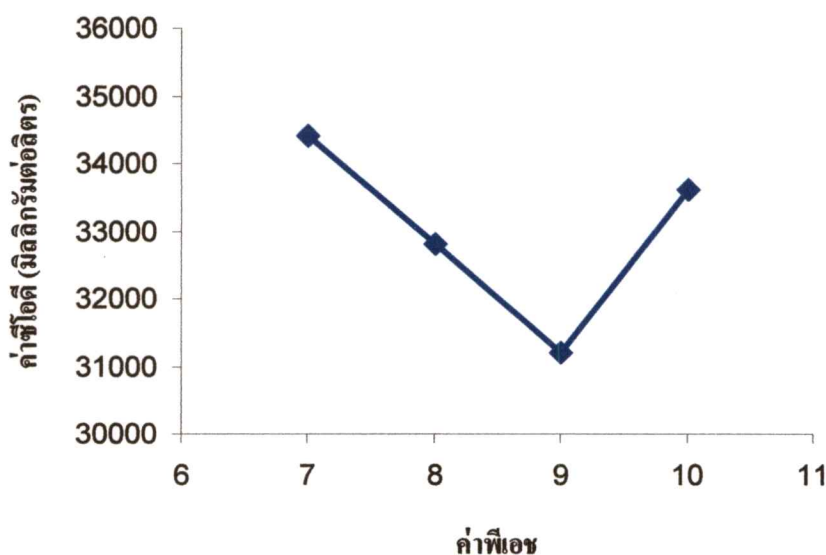
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมีของน้ำเสียจากลำใช้ ตัวชี้วัดคือค่าซีไอดีโดยน้ำจากลำนี้มีค่าซีไอดีที่สูง ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบโอโซน เพื่อลดค่าซีไอดีและของแข็งต่างๆที่จะเป็นตัวขัดขวางประสิทธิภาพการทำงานของโอโซน

ผลการศึกษารวมตะกอนระหว่างพอลิอูมิเนียมคลอไรด์กับเฟอริกคลอไรด์ เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของพอลิอูมิเนียมคลอไรด์และเฟอริกคลอไรด์ พบว่าพอลิอูมิเนียมคลอไรด์สามารถลดค่าซีไอได้ดีกว่า จากรูปที่ 4-1 พอลิอูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าซีไอได้ถึงเหลือ 32,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 750 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดค่าซีไอได้ถึงเหลือ 35,200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข-1) จึงใช้พอลิอูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการรวมตะกอนทางเคมีต่อไป แต่จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารรวมตะกอนมากขึ้น พบว่าค่าซีไอสูงขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Veronica *et al.* (1996) กล่าวว่า ถ้าพื้นที่ผิวของคอลลอยด์มีประจุบวกมากเกินไปจากการเติมสารรวมตะกอน จะทำให้ไม่เกิดกระบวนการรวมตะกอนเกิดขึ้น เพราะเกิดแรงผลักระหว่างประจุบวกของอนุภาค



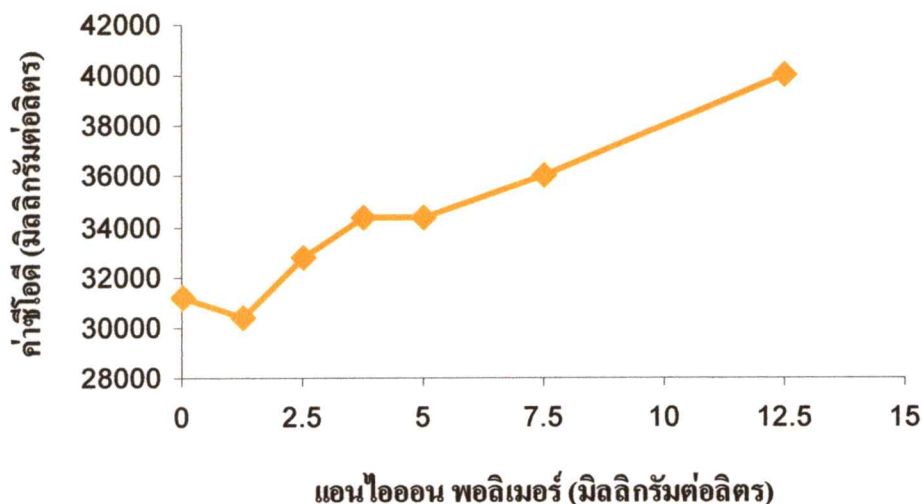
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอ กับค่าพีเอช ของสารรวมตะกอนเฟอริกคลอไรด์และพอลิอูมิเนียมคลอไรด์

เมื่อนำพอลิลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการรวมตะกอนพบว่าที่พีเอช 9 สามารถลดค่าซีไอได้ถึงเหลือ 31,200 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูป 4-2 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข-2) ซึ่งจากงานวิจัยของ Chaudhari *et al.* (2007) พบว่าพอลิลูมิเนียมคลอไรด์ที่ค่าพีเอช 5.5 จะลดค่าซีไอได้มากที่สุด ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 60 % แต่ในการทดลองไม่สามารถปรับค่าพีเอชได้ต่ำกว่า 5 เนื่องจากมีความไม่เหมาะสมทางกายภาพ จากฟองที่เกิดขึ้นในปริมาณมากขณะปรับค่าพีเอชด้วยกรด แต่หลังจากพีเอช 7 เป็นต้นไป



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับค่าพีเอชของสารรวมตะกอนพอลิลูมิเนียมคลอไรด์

เมื่อทราบค่าความเข้มข้นและค่าพีเอชของพอลิลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแล้ว จึงศึกษาค่าความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งสารช่วยรวมตะกอนที่ใช้คือ แอนไอออนพอลิเมอร์ จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นแอนไอออน พอลิเมอร์ เท่ากับ 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าซีไอได้ถึงเหลือ 30,400 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข-3) คิดเป็นร้อยละ 32 ถ้าเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นทำให้ค่าซีไอมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งงานวิจัยของ Wong *et al.* (2006) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์เกินความเหมาะสม ไม่ส่งผลต่อการลดค่าซีไอดีและทำให้เกิดการกระจายของกลุ่มคอลลอยด์ เป็นผลให้ค่าซีไอมีค่าสูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของแอนไอออน พอลิเมอร์ แสดงดังรูป 4-3



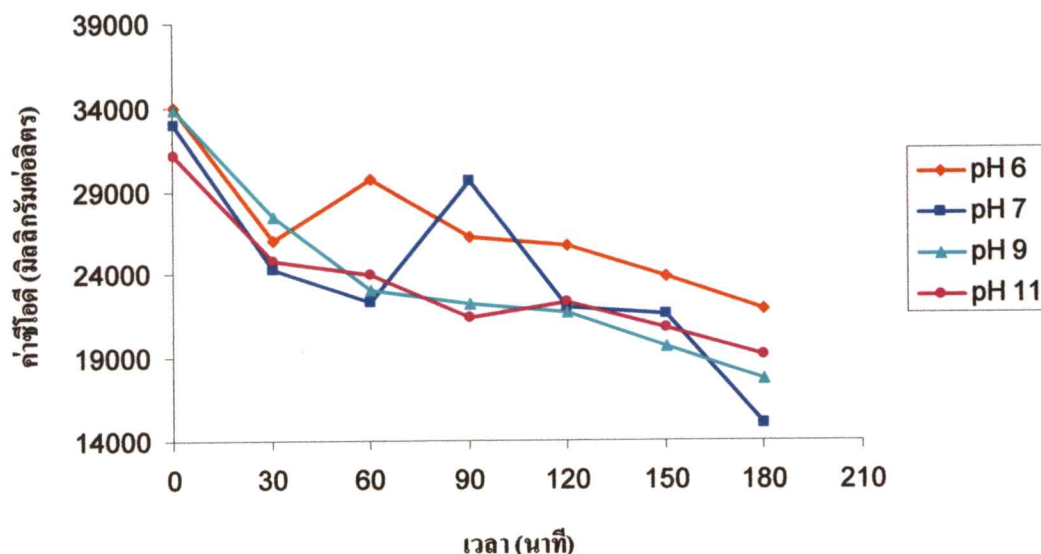
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับความเข้มข้นของแอนไอออน พอลิเมอร์

4.3 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าด้วยโอโซนเนชัน

การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ด้วยโอโซนเนชัน โดยใช้ น้ำเสียด่างที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีด้วย พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรและ แอนไอออน พอลิเมอร์ 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแปรค่าพีเอชที่ 6, 7, 9 และ 11

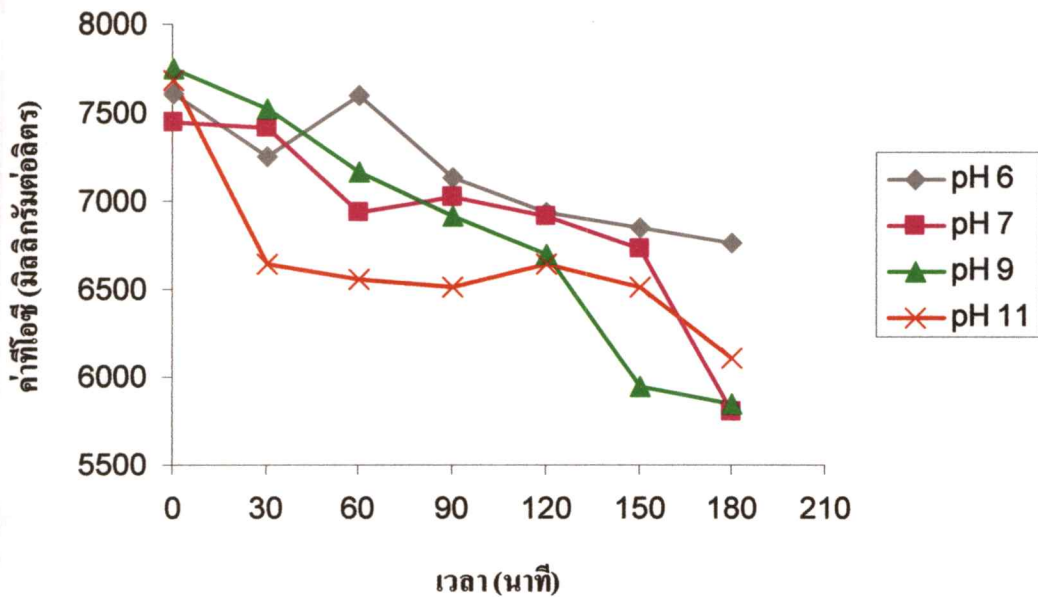
พบว่าแนวโน้มที่ระยะเวลาต่างๆตั้งแต่เริ่มต้น ที่พีเอช 9 สามารถลดค่าซีไอดีได้มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ใช้จึงเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียด่างด้วย โอโซนเนชัน ส่วนที่ค่าพีเอช 6, 7 และ 11 พบว่าขณะเติมก๊าซโอโซนเกิดฟองก๊าซจำนวนมากและหลุดออกจากระบบทำให้ปริมาตรน้ำในระบบลดลง อย่างไรก็ตามฟองดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยขวดดักจับฟอง และเมื่อกลายเป็นน้ำจึงนำกลับเข้าสู่ระบบอีกครั้งในช่วงเวลาเก็บตัวอย่างถัดไป เป็นผลให้ค่าซีไอดีเพิ่มขึ้นเป็นช่วงๆ เพราะน้ำที่เกิดจากฟองดังกล่าวไม่ได้สัมผัสกับก๊าซโอโซน จึงไม่เกิดปฏิกิริยาภายในขวดดักจับฟอง

จากรูปที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าพีเอชต่างๆส่งผลต่อการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน โดยแนวโน้มของ พีเอช 9 และ 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีได้ดีกว่าพีเอช 6 และ 7 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข-4) เพราะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยผ่านแรดิคัล (Radical Mediate Oxidation) ซึ่งในสถานะที่เป็นด่างเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ดีกว่าปฏิกิริยาของก๊าซโอโซนทางตรง (Direct oxidation) นอกจากนี้ไฮดรอกซิลแรดิคัลยังไม่จำเพาะเจาะจงกับสารอินทรีย์ ดังนั้นที่สถานะเป็นด่าง จึงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า



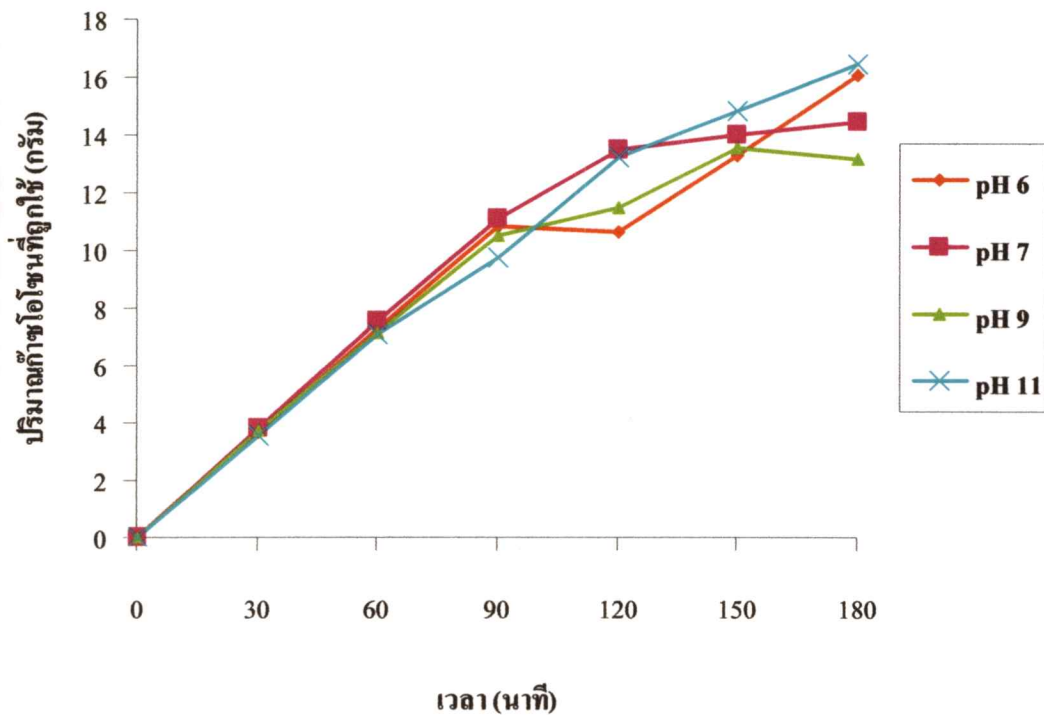
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนเข้มข้น
ที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11

ก๊าซโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาภายในถังปฏิกิริยาที่ออกจากระบบถูกดักจับด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (KI 2%) และนำไปหาปริมาณก๊าซโอโซนที่ทำปฏิกิริยาในเวลาต่างๆ พบว่าเมื่อระยะเวลาเริ่มต้นถึงเวลา 90 นาที มีปริมาณก๊าซโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกมาน้อย แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปมากกว่า 90 นาที พบว่าเกิดความแตกต่างในการทำปฏิกิริยา โดยที่ค่าพีเอช 7 และ 9 มีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยาลดลง และที่พีเอช 6 และ 11 มีการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข-7) แสดงดังรูปที่ 4-5 เนื่องจากพีเอช 7 และ 9 มีความสามารถในการลดค่าซีไอดีได้รวดเร็วกว่า ดังนั้นสารอินทรีย์ที่ถูกก๊าซโอโซนทำปฏิกิริยา ได้ถูกกำจัดไปแล้ว คงเหลือแต่สารอินทรีย์ที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซน ก๊าซโอโซนจึงออกนอกระบบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุเมธ (2541) ที่ค่าพีเอช 11 ก๊าซโอโซนถูกใช้มากที่สุดแต่ผลการบำบัดค่าซีไอดีไม่ได้แสดงผลว่าดีที่สุด เนื่องจากในสถานะเป็นค่าโอโซนใช้ไฮดรอกไซด์ไอออนเพื่อให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล แต่ในน้ำเสียดก่าพบว่ามีตัวยับยั้ง (Inhibitor/ Scavenger) การทำงานของไฮดรอกซิลเรดิคัล จากไบคาร์บอเนตหรือคาร์บอเนต ซึ่งสามารถหยุดปฏิกิริยาถูกใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และลดประสิทธิภาพการบำบัดได้ (Feng – Zeng *et al.*,2009)



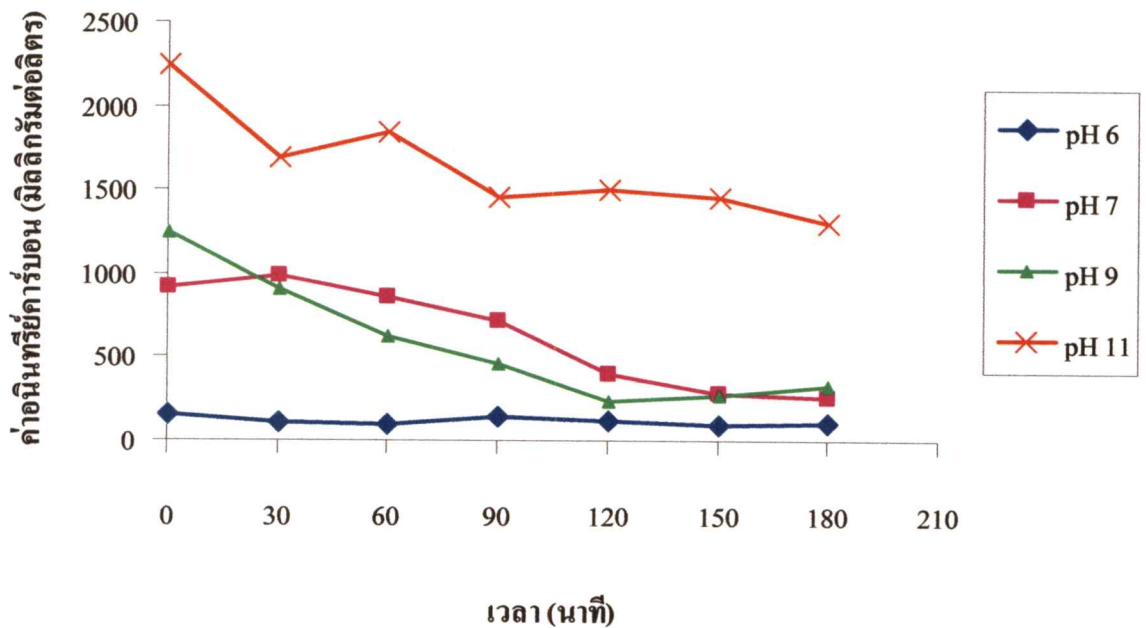
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทีโอซี กับเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนเนชั่น
ที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11

ค่าสารอนินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียด่างต่ำเริ่มต้นมีค่า 1,621 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่า ในน้ำเสียด่างต่ำอาจมีไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตอยู่ด้วย ซึ่งสารอนินทรีย์นี้เป็นตัวยับยั้ง (Inhibitor/Scavenger) การทำงานของไฮดรอกซิลเรดิคัล สามารถหยุดปฏิกิริยาถูกใช้ในการกำจัด สารอินทรีย์ได้ ค่าพีเอช 6 ที่ปรับพีเอชด้วยกรดทำให้ค่าสารอนินทรีย์คาร์บอนมีแนวโน้มลดลง อย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 4-7 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข-4) เนื่องจากกรดทำให้ ไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตในน้ำเสียด่างสูงเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง สังเกตได้จากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นขณะปรับค่า พีเอชด้วยกรด



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไอโซนที่ถูกใช้กับเวลาที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11

นอกจากค่าซีไอดีที่ลดลง พบว่าค่าที่ไอซีมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน เมื่อระยะเวลาผ่านไป แต่การนำน้ำที่เกิดจากฟองก๊าซกลับเข้าสู่ระบบ ทำให้ค่าที่ไอซีเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ไอซีกับเวลาที่พีเอชต่างๆพบว่าที่พีเอช 9 ในช่วง 120-180 นาที จะมีค่าที่ไอซีต่ำกว่าพีเอชอื่นๆ ส่วนที่เวลา 0-120 นาที พีเอช 11 จะมีแนวโน้มที่ต่ำกว่า แต่พีเอช 11 อาจต้องใช้ค่าใช้จ่ายในสูงสำหรับสารเคมีที่ต้องใช้ปรับพีเอช เนื่องจากพีเอชเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 8.50 - 8.82 ดังนั้นเมื่อดูจากค่าแนวโน้มที่พีเอชต่างๆ จึงสรุปได้ว่าที่พีเอช 9 มีความเหมาะสมกว่าในการลดค่าที่ไอซี (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข-4) แสดงดังรูป 4-6

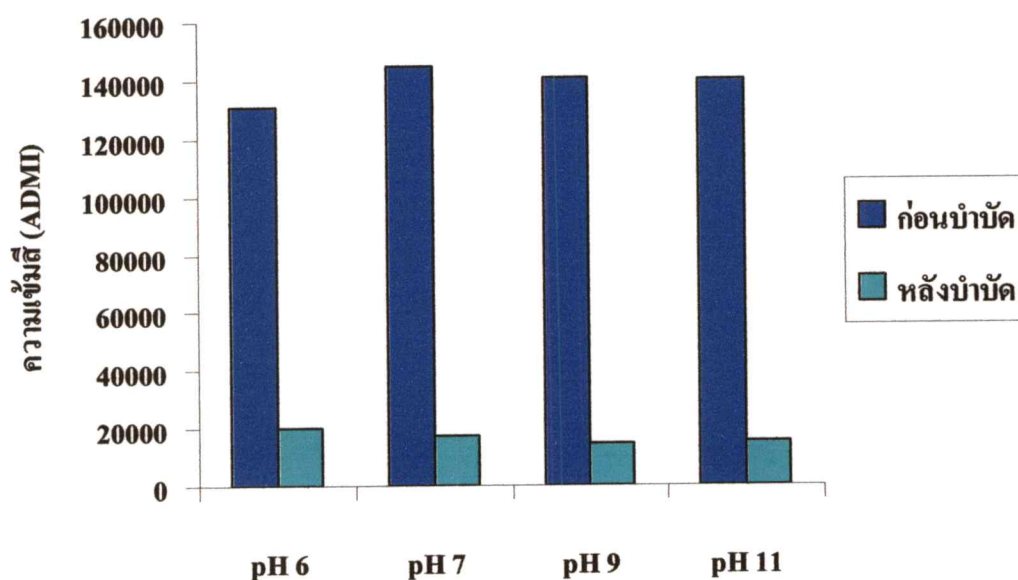


รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอนินทรีย์คาร์บอน กับเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนชั้นที่ค่าพีเอช 6, 7, 9 และ 11

4.4 การศึกษาความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียกากส่า

อัตราส่วนของ BOD_5/COD สามารถบอกความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ของสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ โดยหากค่า BOD_5/COD เพิ่มขึ้นแสดงว่ามีสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมากขึ้น ทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

จากการทดลองพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที การบำบัดด้วยก๊าซโอโซนที่ค่าพีเอชต่างๆ ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่า BOD_5/COD เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโอโซนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เช่น เมลานอยดิน เปลี่ยนสภาพเป็นสารอินทรีย์ที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพต่อไปได้ แสดงดังรูปที่ 4-8 โดยก๊าซโอโซนทำให้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพให้ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น เนื่องจากก๊าซโอโซนไปทำลายพันธะต่างๆของสารอินทรีย์ในน้ำเสียกากส่า เช่น เมลานอยดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Coca *et al.* (2005) และงานวิจัยของ Pena *et al.* (2003) กล่าวว่า โอโซนชั้นสามารถลดสารประกอบอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูงให้มีมวลโมเลกุลที่ต่ำ และสามารถลดความเข้มข้นของกลุ่มโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มในน้ำเสียได้



รูปที่ 4-9 ความเข้มสีในหน่วย ADMI ก่อนและหลังโอโซนชัน

4.6 ผลการบำบัดน้ำภาคกล้าด้วยการรวมตะกอนทางเคมีและโอโซนชัน

จากการทดลองการรวมตะกอนทางเคมีพบว่าสารรวมตะกอนที่เหมาะสมคือพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าพีเอช 9 ใช้สารช่วยรวมตะกอนแอนไอออนพอลิเมอร์ ที่ความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และโอโซนชัน โดยอัตราการผลิตก๊าซโอโซน 7.63 กรัมต่อชั่วโมง ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ 2 ลิตร ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการรวมตะกอนในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว พบว่าค่าพีเอช 9 มีความเหมาะสมมากที่สุด ทั้งทางด้านกายภาพและปริมาณสารอินทรีย์ที่มีค่าลดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดรวมของซีโอดีที่โอซีและความเข้มสีในหน่วย ADMI คือ 60.48%, 35.87% และ 90.93% ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1050 เป็น 0.1886 แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4 -2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากลำที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีและโอโซนชั้น

พารามิเตอร์	น้ำเสียดักสำก่อนบำบัด	การรวมตะกอนทางเคมี		โอโซนชั้น		% การกำจัดรวม
		เมื่อผ่านการรวมตะกอนทางเคมี	% การกำจัด	เมื่อผ่านโอโซนชั้น	% การกำจัด	
COD	44,800 mg/L	31,200 mg/L	30.35	17,706 mg/L	43.25	60.48
BOD	4,700 mg/L	1,830 mg/L	24.26	3,340 mg/L	-82.51	28.94
BOD/COD	0.1050	0.0587	-	0.1886	-	-
TOC	9,116 mg/L	8,076 mg/L	11.41	5,846 mg/L	27.61	35.87
ความเข้มสี (ADMI)	157,563	132,015	16.21	14,297	89.17	90.93

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

1. น้ำเสียด่างมีสีน้ำตาลเข้มและมีกลิ่นที่แรงค่าสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีมีค่าสูงถึง 44,800 มิลลิกรัมต่อลิตรและเป็นสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก
2. สารเคมีที่เหมาะสมในการตกตะกอนทางเคมีของน้ำเสียด่างคือ พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ค่าความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ค่าพีเอชที่เหมาะสม คือพีเอช 9 โดยสารช่วยตกตะกอนแอนไอออน พอลิเมอร์ มีความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าซีไอดี ลงเหลือ 30,400 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัด 32
3. การศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อค่าซีไอดี ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน พบว่าที่พีเอช 9 และพีเอช 11 มีแนวโน้มในการลดค่าซีไอดีได้ดี แต่พีเอช 11 อาจต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงสำหรับสารเคมีที่ต้องใช้ปรับค่าพีเอช ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่พีเอช 9 มีความเหมาะสมกว่าในการลดค่าซีไอดี
4. กระบวนการโอโซนเนชันทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียด่างที่มีโครงสร้างยากต่อการถูกย่อยสลายทางชีวภาพ เปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย พบว่าเมื่อน้ำเสียด่างผ่านกระบวนการโอโซนเนชัน 180 นาที อัตราส่วน BOD_5/COD มีค่าเพิ่มขึ้นทุกพีเอชและพบว่าที่พีเอช 7 มีอัตราส่วน BOD_5/COD สูงที่สุด ที่อัตราส่วน BOD_5/COD เท่ากับ 0.2355
5. กระบวนการ โอโซนเนชัน สามารถลดสีในน้ำเสียด่างที่ค่าพีเอชต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ค่าพีเอช 9 สามารถลดสีได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละการกำจัด เท่ากับ 90
6. การรวมตะกอนทางเคมีและโอโซนเนชัน สามารถลดค่าสารอินทรีย์และความเข้มข้นสีในน้ำเสียด่างได้ โดยประสิทธิภาพรวมในการบำบัดรวมของซีไอดี ทีไอซีและความเข้มข้นสีในหน่วย ADMI คิดเป็นร้อยละการกำจัดคือ 60.48, 35.87 และ 90.93 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีการลดฟองที่เกิดขึ้นขณะบำบัด
2. ควรศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการ โอโซนเนชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้สูงขึ้น เช่น เหล็กออกไซด์หรือทินออกไซด์ เป็นต้น
3. ควรนำน้ำเสียด่างที่ผ่านกระบวนการ โอโซนเนชันเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอีกครั้ง เพราะมีอัตราส่วน BOD_5/COD ที่สูงขึ้น

4. ควรศึกษาการกระบวนการ โอโซนร่วมกับรังสียูวีหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Advanced Oxidation Process, AOPs) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้สูงขึ้น
5. ควรศึกษาพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอยในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี เพื่อ ยืนยันผลการรวมตะกอน
6. ควรนำกากตะกอนที่เกิดขึ้นไปประยุกต์ใช้ เป็นปุ๋ยอินทรีย์ เนื่องจากมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

เอกสารอ้างอิง

- กนกศักดิ์ เอี่ยมโอบาสและคณะ. 2543. คู่มือตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากโครงการประเภท
เชื้อกระดาษ/โรงงานน้ำตาล. พิมพ์ครั้งที่ 1 .กรุงเทพมหานคร.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่ง
ประเทศไทย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2539. การบำบัดน้ำเสีย.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัย
รังสิต.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2543. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม,
มหาวิทยาลัยรังสิต.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน,โครงการส่งเสริมเทคโนโลยีชีวภาพ
[online] เข้าถึงเมื่อ 24 กันยายน 2553 Available :
http://www.thaibiogas.com/book/Book_06.html.
- เจตนิพิฐ สุดทองคง, ณัฐพงศ์ ไพรยสุรินทร์และนาคยา สุขประเสริฐ. 2552. การบำบัดสีในน้ำเสีย
สังเคราะห์ที่มีสีข้อมริแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชั้น. ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตร์
บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- พัชรินทร์ ถาปินตา. 2551. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ
ด้วยกระบวนการตกตะกอนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากร , มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- พรวิษา แกสมาน, ภัทธา คงภักดีและภาณุพงศ์ เฟื่องวัน. 2551. การกำจัดสีข้อมริแอกทีฟในน้ำเสีย
สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้น. ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พรศักดิ์ สมร ไกรสรกิจ.[Online].Available : <http://www.mwa.co.th> เข้าถึงเมื่อ 4 ตุลาคม พ.ศ.2553
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2537. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1 . โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม,
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2551. กระบวนการบำบัดน้ำเสีย. [Online].Available :
<http://www.efe.or.th> เข้าถึงเมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2553.

- รุ่งทิพย์ วงศ์ต่อม. 2549. การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในกระบวนการอบแห้งลำไย (*Euphoria longana Lam.*) แบบทั้งผล. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ศักดิ์ชัย ชื่อวัฒนานุกร. 2539. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สันศักดิ์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2544. กากน้ำตาล. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. [Online]. Available : <http://www.tistr.or.th> เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม 2553.
- สุเมธ ขวเดช. 2541. การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันไอโชนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรพล รักปทุม. 2543. ไอโชนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ภาพพิมพ์.
- Amuda O.S., Amoo I.A., 2007. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment . **Journal of Hazardous Materials** ,141 : 778-783.
- Ann C.W., Kelly J. R., John M.O. 2000. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy** ,19 : 63-102.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. USA : American Public Health Association.
- Cammerer B., Jalyschkov V., Kroh L.W. 2002. Carbohydrate structures as part of the melanoidin skeleton. **International Congress Series**, 1245 : 269– 273.
- Chandra R., Bharagava R.N., Rai V. 2008. Melanoidins as major colourant in sugarcane molasses based distillery effluent and its degradation : A review. **Bioresource technology**, 99 : 4648-4660.
- Chaudhari P.K., Mishra I.M., Chand S., 2007. Decolourization and removal of chemical oxygen demand (COD) with energy recovery : Treatment of biodigester effluent of a molasses-based alcohol distillery using inorganic coagulants. **Colloids and Surfaces A**, 296 : 238-247.
- Coca M., Pena M., Gonzalez G. 2005. Variables affecting efficiency of molasses fermentation wastewater ozonation. **Chemosphere**, 60 : 1408-1415.

- Deng L., Chen H., Chen Z., Liu Y., Pu X., Song L., 2009. Process of simultaneous hydrogen sulfide removal from biogas and nitrogen removal from swine wastewater. **Bioresource Technology**, 100 : 5600-5608.
- Dwyer J., Griffiths P., Lant P. 2009. Simultaneous colour and DON removal from sewage treatment plant effluent: Alum coagulation of melanoidin. **Water research**, 43 : 553-561.
- Feng –Zeng Y., Zi-Li L., Zu-Zeng Q., 2009. Decolorization of molasses fermentation wastewater by SnO₂-catalyzed ozonation. **Journal of Hazardous Materials**, 162 : 682-687.
- Gottschalk C., Libra J.A. and Saupe A. 2000. **Ozonation of water and wastewater**. WILEY-VCH. Weinheim.
- Langlais B., Reckhow D.A., Brink D.R.. 1991. **Ozone in water treatment : Application and engineering : cooperative research report**. Chelsea,MI : Lewis.
- Liang Z., Wang Y., Zhou Y., WU Z. 2009. Variables affecting melanoidins removal from molasses wastewater by coagulation/flocculation. **Separation and purification technology**, 68 : 382-389.
- Martins S.I.F.S., Jongen W.M.F., Boekel M.A.J.S.V. 2001. A review of maillard reaction in food and implications to kinetic modeling. **Trends in Food Science & Technology** ,11 : 364–373.
- Mohana S., Acharya B.K., Madamwar D., 2009. Distillery spent wash : Treatment technologies and potential application. **Journal of Hazardous Materials** ,163 : 12-25.
- Pena M., Coca M., Gonzalez G., Rioja R., Garcia M.T., 2003. Chemical oxidation of wastewater from molasses fermentation with ozone. **Chemosphere**, 51 : 893-900.
- Ryan D., Gadd A., Kavanagh J., G.W. Barton. 2009. Integrated biorefinery wastewater design. **Chemical Engineering Research and Design** ,87 : 1261-1268.
- Satyawali Y., Balakrishnan M., 2008. Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal : A review. **Journal of Environmental management**, 86 : 481-497.

- Tanaka Y., 2002. A dual purpose packed-bed reactor for biogas scrubbing and methane - dependent water quality improvement applying to a wastewater treatment system consisting of UASB reactor and trickling filter. **Bioresource Technology**, 84 : 21-28.
- Turkdogan-Aydinol F., Yetilmezsoy K. 2010. A fuzzy-logic-based model to predict biogas and methane production rates in a pilot-scale mesophilic UASB reactor treating molasses wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, 182 : 460–471.
- Veronica P.M., Ernesto J.D.R., Masatoshi M. 1996. Flocculation of melanoidins induced by inorganic ions. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, Vol.83, No.3: 287-291.
- Wilkie A.C., Riedesel K.J., Owens J.M. 2000. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, 19 : 63-102
- Wong S.S., Teng T.T., Ahmad A.L., Zuhairi A., Najafpour G. 2006. Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation. **Journal of Hazardous Materials**, B135 : 378-388.
- Yavuz Y. 2007. EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. **Separation and purification technology**, 53 : 135-140.

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

ก-1 การวัดปริมาณไอโชน

การวัดปริมาณไอโชนสามารถวัดด้วยวิธีไอโอดิเมทรี (Iodometry) โดยอัตราการผลิตก๊าซไอโชนสามารถวัดได้ดังนี้

1) สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2% ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต 0.1 M

ชั่งโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไดไฮเดรต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 7.8 กรัม ไดไฮเดรตไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) 7.1 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 20.0 กรัม ละลายให้เข้ากันด้วยน้ำกลั่น เมื่อทำการละลายแล้วทำการเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มล. เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน ก่อนใช้ วัดค่าพีเอช และปรับค่าพีเอชให้เป็น 7 เก็บไว้ในขวดสีชาป้องกันการสัมผัสกับแสงแดด

2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 N

ละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 24.8 กรัมในน้ำกลั่น ต้มและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิ เดิมกลอโรฟอร์ม (CHCl_3) ลงไป 5 มล. หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มล.

3. สารละลายปรูมภูมิโพแทสเซียมไอโอเดต หรือ โพแทสเซียมไบโอไอเดต 0.1000 N

นำโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) หรือ โพแทสเซียมไบโอไอเดต ($\text{KH}(\text{IO}_3)_2$) อบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่ง KIO_3 3.567 กรัม หรือ ชั่ง $\text{KH}(\text{IO}_3)_2$ 3.249 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มล. จะได้ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 0.1000 N

4. น้ำแข็ง

ชั่งแข็งมัน 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มล. ต้มให้เดือด เป็นเวลา 2-3 นาที ตั้งทิ้งไว้ 1 วัน นำส่วนที่ใสแยกออกมา เดิมกรดซาลิซิลิก 1.25 กรัม เพื่อเก็บรักษาได้นาน ทำการเก็บในตู้เย็นรักษาอุณหภูมิ 4 °C

2) การทดลอง

1. การดูดซึมก๊าซไอโชน โดยผ่านก๊าซจากชุดทดลองในขวดคักก๊าซที่มีสารละลาย KI 2 % ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด

2. นำสารละลาย KI (มีสีเหลืองหรือส้ม) 100 ml เดิม 1 N H_2SO_4 3 มิลลิลิตร เพื่อปรับ pH

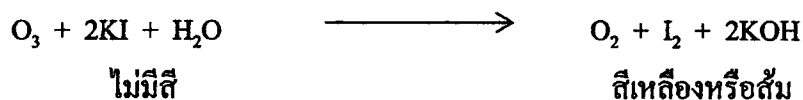
3. นำมาไทเทรตกับสารละลาย 0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จนสีเหลืองค่อยๆ หายไป

4. เติมน้ำแข็ง 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนสีน้ำเงินหายไป

5. บันทึกปริมาตรของสารละลาย 0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณก๊าซไอโอดีนที่มีอยู่ระบบ

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ

- การดูดซึมไอโอดีนโดยใช้สารละลาย KI



- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$



3) การคำนวณหาปริมาณก๊าซไอโอดีน

O_3 1 โมล เกิด I_2 1 โมล จากนั้น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 2 โมล ทำปฏิกิริยากับ I_2 1 โมล

เพราะฉะนั้น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ปริมาตร X mL ความเข้มข้น 0.1 N จะเท่ากับ 0.1 M

จะได้เนื้อสารของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เท่ากับ $[(0.1 \text{ mol}) / 1000 \text{ mL}] \times X \text{ mL}$

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 2 โมล ต้องใช้ O_3 1 โมล

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (0.1 X) / 1000 โมล ต้องใช้ O_3 0.05 × / 1000 โมล

O_3 1 โมล มีน้ำหนัก 48 กรัม

O_3 0.05 X / 1000 โมล จะมีน้ำหนัก 48 (0.05 × / 1000) กรัม

ดังนั้นปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้น เท่ากับ 0.0024 × กรัม

$$\text{O}_3 (\text{mg}) = 2.4 \times \text{ปริมาตร } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 (\text{ml})$$

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

1. ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 80 มล.
2. เติมสารละลาย KIO_3 หรือ $\text{KH}(\text{IO}_3)_2$ ความเข้มข้น 0.1000 N 10.00 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 มล.
3. นำไปไทเทรตด้วย 0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จนกระทั่งได้สารละลาย สีเหลืองอ่อน จากนั้นเติมน้ำแข็ง 1 มล. จะได้สารละลายสีน้ำเงิน
4. ไทเทรตต่อจนสารละลายสีน้ำเงินหายไป บันทึกปริมาตรของสารละลาย 0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้

ก-2 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (APHA,2005)

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. ฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
3. เซลล์วัดแสงที่มีช่วงแสง 10 มิลลิเมตร

2) สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางสำหรับปรับ พีเอช
2. โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट (K_2PtCl_6) เตรียมได้จาก 2.1 หรือ 2.2

2.1 โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट (K_2PtCl_6) จำนวน 1.246 กรัมในน้ำกลั่นเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร และโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 1.000 กรัม และเจือจางจนได้ปริมาตร 1.000 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตร ซึ่งจะมีหน่วยสีเท่ากับ 500 ADMI

2.2 โลหะแพลตตินัมบริสุทธิ์ 500 มิลลิกรัม ละลายในกรดกัดทอง (Aqua regia) โดยการให้ความร้อนไล่กรดไนตริกด้วยการระเหย และเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นลงไปใหม่ จนละลายได้หมด จากนั้นเติม โคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 1.000 กรัม แล้วจึงปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

3) การทดลอง

1. การเตรียมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 200, 250, 300, 400 และ 500 ADMI โดยการเจือจางสารละลายสต็อกจากสารเคมีข้อ 2.1 หรือ 2.2 โดยปีเปตมา 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็นปริมาตร 50 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร สำหรับสารละลายสีมาตรฐานที่มีสีเท่ากับ 500 ADMI ไม่ต้องปรับปริมาตรใดๆ ทั้งสิ้นนำมาวัดค่าทรานส์มิตแดนซ์ (%T) แต่ละความยาวคลื่นดังตารางที่ ก-1

2. ทำการกรองตัวอย่างน้ำ ด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร

3. นำไปวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ตามตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 การวัดหาค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

Coordinate	X	Y	Z
No.	Wavelength (nm)		
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	654.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.10000	0.11814

4. เมื่อได้ค่า %T ของแต่ละความยาวคลื่นแล้วให้นำค่ามารวมกันในแต่ละแกน จากนั้นคูณด้วย Factor ของแกนนั้น ๆ จะได้ค่าที่คูณ Factor ของแกน X, Y, Z โดยจะให้สัญลักษณ์เป็น X_s , Y_s และ Z_s ตามลำดับ และให้ค่าของน้ำกลั่น เป็น X_c , Y_c และ Z_c ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.06, 100.00 และ 118.14 ตามลำดับ

5. นำค่า X_s , Y_s , Z_s , X_c , Y_c และ Z_c แปลงเป็นค่าของ Munsell ก็คือเป็น V_{xs} , V_{ys} , V_{zs} , V_{xc} , V_{yc} และ V_{zc} ตามค่าของตารางของ Adam – Nickerson (Wyszecki, G. and Stiles, W.S., 2000)

6. เมื่อได้ค่าแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า DE ของแต่ละตัวจากสมการของ Bridgeman

$$DE = [(0.23 \Delta V_y)^2 + (\Delta(V_x - V_y))^2 + (0.4\Delta(V_y - V_z))^2]^{1/2}$$

โดยที่

$$\Delta V_y = V_{yc} - V_{ys}$$

$$\Delta(V_x - V_y) = (V_{xc} - V_{yc}) - (V_{xs} - V_{ys})$$

$$\Delta(V_y - V_z) = (V_{yc} - V_{zc}) - (V_{ys} - V_{zs})$$

7. นำค่า DE ที่ได้มาคำนวณหาค่า ADMI จากสมการ

$$\text{ADMI UNIT} = \frac{(F)(DE)}{b}$$

โดยที่

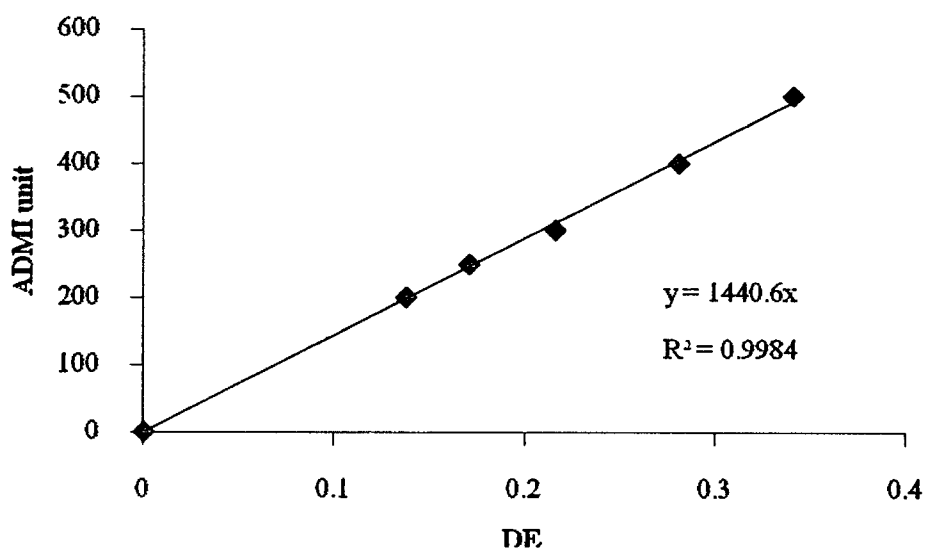
F คือ ค่า Calibration factor ที่ได้จากความชันของการพลอตกราฟของค่า ADMI กับค่า DE ของตัวอย่างสีมาตรฐาน

b คือ ความกว้างของเซลล์วัดแสง (cm.)

4) การคำนวณและแปลผล

1. การคำนวณ Calibration factor (f)

เป็นการนำค่าเอดีเอ็มไอของสีมาตรฐานที่เตรียมได้จากภาคผนวก ก-3 มาพล็อตเทียบกับค่า DE ที่คำนวณได้ จะได้ Calibration factor (f) จากความชันของกราฟ ดังรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน

2. ทำการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (%T) ในแต่ละความยาวคลื่นดังตารางที่ ก-1 จะได้ค่าดังตัวอย่าง

X	67.8	75.1	88.2	90.6	92.5	93.8	94.7	95.6	96.7	98.6
Y	80.8	84.7	86.5	87.9	89.0	90.3	91.8	93.3	94.7	96.9
Z	62.8	66.6	68.7	70.5	72.1	73.6	75.5	76.8	78.8	81.9

3. นำค่าที่ได้จากแต่ละแกนมารวมกัน

$$X = 67.8+75.1+88.2+90.6+92.5+93.8+94.7+95.6+96.7+98.6$$

$$X = 893.6$$

$$Y = 80.8+84.7+86.5+87.9+89.0+90.3+91.8+93.3+94.7+96.9$$

$$Y = 895.9$$

$$Z = 62.8+84.7+86.5+87.9+89.0+90.3+91.8+93.3+94.7+96.8$$

$$Z = 727.3$$

4. นำผลรวมที่ได้แต่ละแกนคูณกับแฟกเตอร์จากตารางที่ ก-1

$$X_s = 893.6 \times 0.09806 \quad X_s = 87.62$$

$$Y_s = 895.6 \times 0.1 \quad Y_s = 89.56$$

$$Z_s = 727.3 \times 0.11814 \quad Z_s = 85.923$$

5. นำค่า X_c Y_c Z_c X_s Y_s และ Z_s (X_c Y_c และ Z_c ได้มาจากการนำน้ำกลั่นไปวัดและคำนวณเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง) แปลงเป็นค่า Munsell จาก ตารางของ Adam – Nickerson (Wyszecki, G. and Stiles, W.S., 2000) จะได้เป็นค่า เป็น V_{xc} , V_{yc} , V_{zc} V_{xs} , V_{ys} และ V_{zs} ตามลำดับจะได้ $V_{xc} = 9.9$ $V_{yc} = 9.9$ $V_{zc} = 9.9$ $V_{xs} = 9.47$ $V_{ys} = 9.48$ $V_{zs} = 8.72$

6. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า DE

$$DE = \{[(9.9-9.48) \times 0.23]^2 + [(9.9-9.9) - (9.47-9.48)]^2 + [0.4 \times [(9.9-9.9) - (9.48-8.72)]]^2\}^{1/2}$$

$$DE = 0.3188$$

$$ADMI = (0.3188 \times 1440) / 1 = 459.10$$

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสี

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

โดยที่ C_0 = ความเข้มสีเริ่มต้น (ADMI)

C_t = ความเข้มสีที่ถูกกำจัดในเวลาต่างๆ (ADMI)

สมมติความเข้มสีเริ่มต้นเท่ากับ 22451 ADMI

สมมติความเข้มสีที่ 10 นาทีเท่ากับ 459.10 ADMI

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{(22451 - 459.10)}{22451} \times 100$$

$$= 98 \%$$

ก-3 การวิเคราะห์หาซีโอไซด์ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric Method)

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยโบโรซิลิเกต (Borosilicate culture tubes) ขนาด 16×100 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียว ชนิดที่เอฟอี (Tetrafluoroethylene ; TFE)

2. บล็อกฮีทเตอร์ (Block heater) หรือตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 150 ± 2 °C การใช้ตู้อบต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่ 150 °C จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหาย

2) สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล

- นำ $K_2Cr_2O_7$ อบแห้งใน 130 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก $K_2Cr_2O_7$ มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเติมเมอร์คิวรีซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

2. สารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต

- ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย

3. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

- ละลาย (1, 10 - phenanthroline monohydrate $C_{12}H_{18}N_2H_2O$) 1.485 กรัมและไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.695 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 นอร์มัล

- ต้องนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้งก่อนใช้ โดยเติมสารเคมีทุกชนิดตามตารางที่ ก-2 ลงในหลอดแก้วที่ต้องการ โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทิ้งให้เย็น เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย FAS จุดยุติจะเปลี่ยนจากเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

ตารางที่ ก-2 ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

ขนาดหลอดย่อยสลาย	ปริมาตรน้ำ (มล.)	ปริมาตรสารละลาย โพแทสเซียมไดโครเมต สำหรับย่อยสลาย (มล.)	สารละลายกรด ซัลฟูริก (มล.)	ปริมาตรรวม (มล.)
หลอดแก้ว 16×100 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5
20×150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25×150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0
หลอดมาตรฐาน 10 มล.	2.5	1.5	3.5	7.5

3) การทดลอง

- ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟูริก 20 % ก่อนใช้ทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
 - หลอดแก้วที่ใช้หาซีไอดีหลายขนาด การเลือกใช้ขึ้นกับค่าซีไอดีที่มีในตัวอย่างน้ำ ในกรณีค่าซีไอดีต่ำๆ (< 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ให้ใช้หลอดแก้วขนาด 25 × 150 มิลลิเมตร ถ้าค่าซีไอดีสูง ใช้ตัวอย่างน้ำในปริมาณน้อยจึงใช้หลอดแก้วขนาดเล็ก (16 × 100 มิลลิเมตร) โดยปกติจะใช้หลอดมาตรฐานที่มีความจุสูงสุด 10 มิลลิตร หรือขนาด (16 × 100 มิลลิเมตร) เพราะใช้สารเคมีน้อยที่สุด ดังนั้นตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีไอดีต่ำๆ มักจะมีค่าผิดพลาดเนื่องจากตัวอย่างน้ำน้อยเกินไป
 - เมื่อเลือกขนาดหลอดแก้วแล้วให้ใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิตร โดยเติมตัวอย่างน้ำลงหลอดแก้วแล้วเติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตโดยปีเปิด 3 มิลลิตร สำหรับย่อยสารละลาย ต่อเติมสารละลายกรดซัลฟูริก 7 มิลลิตร ให้เกิดชั้นกรดยูในแก้ว ปิดฝาให้แน่นพอดี แล้วกลับไปมาเพื่อให้สารละลายผสมกันดี
 - นำหลอดแก้วใส่ลงในฮีทดิงบลิ๊อคหรือตู้อบที่ 150 °C แล้วอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำหลอดแก้ววางลงในขวด
- ข้อควรระวัง :** ควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันความร้อนขณะกลับหลอดแก้วไปมา และควรผสมสารละลายให้เข้ากันก่อนให้ความร้อนเพื่อป้องกันการระเบิด
- เปิดฝาหลอดแก้วใส่แท่งแม่เหล็กขนาดเล็กที่หุ้ม TFE แล้วเติมเฟอร์ไรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด คนอย่างเร็วบนเครื่องกวนแม่เหล็กแล้วไทเทรตกับ FAS 0.05 นอร์มัลจนกระทั่งเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดง หรือเทสารละลายจากหลอดแก้วลงขวดรูปกรวยก็ได้เพื่อความสะดวกในการไทเทรต แต่ต้องใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด
 - ทำแบบลงค์ด้วยทุกครั้ง โดยใช้สารเคมีและน้ำกลั่นปริมาตรเท่ากับตัวอย่างน้ำ

4) การคำนวณ

$$\text{ซีไอดี (มก.O}_2\text{ /ล.)} = \frac{(B - S) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มล.)}}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } B &= \text{ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์ (มล.)} \\ S &= \text{ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มล.)} \\ N &= \text{ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สมมติปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์เท่ากับ 5.45 มล.

สมมติปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างเท่ากับ 3.20 มล.

ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้ 5 มล.

ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.0487 นอร์มัล

$$\text{จะได้ค่าซีไอดี} = \frac{(5.45 - 3.20) \times 0.0487 \text{ N} \times 8000}{5 \text{ มล.}}$$

5 มล.

$$= 175.32 \text{ mg O}_2\text{ /L}$$

ก-4 การวิเคราะห์หาปริมาณบีโอดี

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 °C
2. เครื่องเติมอากาศ
3. ตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิได้ 20 ± 1 °C และไม่มีแสงเข้าภายใน
4. ขวดบีโอดีพร้อมจุก ขนาดมาตรฐาน 300 มิลลิลิตร
5. กระบอกตวงขนาด 1000 มิลลิลิตร
6. แท่งแก้วสำหรับการเจือจางน้ำตัวอย่าง
7. เครื่องวัด DO แบบเมมเบรน อิเล็กโทรด
8. เครื่องแก้วอื่นๆ

2) สารเคมี

1. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เตรียมโดยละลาย Anhydrous CaCl_2 27.5 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
2. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ เตรียมโดยละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.25 กรัมในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
3. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เตรียมโดยละลาย $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 22.5 กรัมในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
4. น้ำกลั่น 2 ครั้ง (ต้องมีทองแดงน้อยกว่า 0.1 มิลลิลิตรต่อลิตร)
กรรมที่ต้องเจือจางน้ำตัวอย่าง ต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่างเอง โดยนำน้ำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง และเติมสารเคมีข้อ 1 - 3 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร
5. สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต พีเอช 7.2 ละลาย KH_2PO_4 8.50 กรัม K_2HPO_4 21.75 กรัม $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 33.40 กรัม และ NH_4Cl 1.70 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
6. หัวเชื้อ
7. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 กรัมในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
8. สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เตรียมโดยละลาย Na_2SO_3 1.575 กรัม แล้วปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
9. สารละลายกลูโคสและกรดกลูตามิก นำกลูโคส และกรดกลูตามิก ไปอบแห้งที่ 105 °C นาน 1 ชั่วโมง นำไปใส่เศษซิเคเตอร์ เมื่อเย็นชั่งอย่างละ 150 มิลลิกรัมนำไปละลาย และใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3) การทดลอง

นำน้ำที่ใช้ในการเจือจาง ชุดควบคุม (Blank set)

1. บรรจุน้ำที่ใช้ในการเจือจางลงขวดบีโอดี 2 ขวด ให้เต็มขวดด้วยวิธีกัลกน้ำ และให้ไหลรินลงตามคอขวด ไม่ให้มีฟองอากาศตกค้างในขวด แล้วปิดจุกแก้ว

2. ขวดที่ 1 ทำการวัดค่าดีไอทันทันที เป็นค่า DO_0

3. ขวดที่ 2 นำไปบ่มที่ $20^{\circ}C$ เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดค่า DO เป็น DO_5 ขณะที่บ่มต้องมีน้ำหล่อบนฝาจุกแก้วและปิดจุกพลาสติกครอบที่จุกแก้วอีกครั้ง เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่หล่อเหนือจุกแก้ว

4. ค่า $DO_0 - DO_5$ ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามากกว่าแสดงว่ามีผลต่อความถูกต้องในการวัด

สารละลายมาตรฐานกลูโคสและกรดกลูตามิก

1. ใช้ในการเจือจางโดยตรง ปิเปตสารละลายกลูโคสและกรดกลูตามิก มา 5 มิลลิตร ลงในขวดบีโอดี เติมน้ำที่ใช้ในการเจือจางลง ไป 3 ขวด ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศภายในเช่นเดียวกับการบรรจุน้ำที่ใช้ในการเจือจาง

2. คว่ำขวดสลับหงายขวดให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันทั่วทั้งขวด เติมน้ำที่ใช้สำหรับการเจือจางหล่อไว้ที่จุกแก้วด้วย

3. วัดค่าดีไอขวดที่ 1 ทันทีเป็นค่า DO_0

4. ขวดที่ 2 และ 3 นำไปบ่มที่ $20^{\circ}C$ เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดค่า DO เป็น DO_5

5. คำนวณหาค่า บีโอดี

น้ำตัวอย่าง

1. เก็บน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มายังห้องปฏิบัติการ แล้วบันทึกข้อมูลแหล่งที่เก็บตัวอย่างน้ำโดยละเอียด

2. ตรวจสอบคุณภาพน้ำทางกายภาพ เช่น สี ความขุ่น กลิ่น ค่าพีเอช ข้อมูลของแหล่งน้ำ เพื่อตัดสินใจเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเจือจางว่าควรเจือจางเท่าไร

3. เตรียมน้ำตัวอย่างตามทฤษฎี เช่น การปรับพีเอช การกำจัดคลอรีนตกค้าง การเจือจางหรืออื่นๆ จากนั้นจึงถ่ายน้ำลงขวดบีโอดีตามวิธี ชุดละ 3 ขวด โดยขวดที่ 1 หาค่า DO_0 ทันที อีก 2 ขวดนำไปบ่มที่ $20^{\circ}C$ ไว้สำหรับหาค่า DO_5 กรณีที่ไม่ต้องเจือจาง

4. กรณีที่ต้องทำเจือจางต้องทำ 3 ชุดของความเข้มข้น ดูจากตารางที่ ก-3

ตารางที่ ก-3 การเลือกเงื่อนไขตัวอย่างให้เหมาะสมในการหาค่า BOD

เมื่อใช้ % ของผสม		เมื่อใช้การเจือจางโดยตรง	
% ของผสม	ช่วงค่าบีโอดี	ปริมาณน้ำตัวอย่าง	ช่วงค่าบีโอดี
0.01	20000 – 70000	0.01	30000 - 105000
0.02	10000 – 35000	0.02	12000 - 42000
0.05	4000 – 14000	0.10	6000 - 21000
0.1	2000 – 7000	0.2	3000 - 10500
0.2	1000 – 3500	0.5	1200 - 4200
0.5	400 – 1400	1.0	600 - 2100
1.0	200 – 700	2.0	300 - 1050
2.0	100 – 350	5.0	120 - 420
5.0	40 – 140	10.0	60 - 210
10.0	20 – 70	20.0	30 - 105
20.0	10 – 35	50.0	12 - 42
50.0	4 – 14	100	6 - 21
100	0 – 7	300	0 - 7

ที่มา : Sawyer, McCarty and Parkin 1994.

- ให้เติมน้ำที่ใช้สำหรับการเจือจางลงในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตรด้วยวิธีก้าน้ำลง ประมาณ 500 มิลลิลิตร ปิดฝาตัวอย่างตามตารางด้านบน โดยจุ่มปลายปิเปตลงใต้ผิวน้ำ

- ทำการเติมน้ำสำหรับการเจือจางให้ไหลรินตามข้างกระบอกตวงจนถึง 1 ลิตร

- ใช้แท่งแก้วคนขึ้นลงเบาๆ ให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เทลวงขวดบีโอดีให้ไหลรินลงตามคอขวดจนเต็ม ห้ามให้มีฟองอากาศ เมื่อปิดจุกต้องมีน้ำหล่อค้ำอยู่

5. กรณีที่ต้องเติมหัวเชื้อในน้ำตัวอย่างและต้องเจือจาง

- ทำเช่นเดียวกับข้อ 4 แต่ให้เติมหัวเชื้อ 2 มิลลิลิตร ลงน้ำก่อนปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ผสมให้เข้ากันและบรรจุลงขวดบีโอดีด้วยวิธีเช่นเดียวกัน

- ทำชุดควบคุมที่มีหัวเชื้อเพิ่มขึ้นอีก 1 ชุด โดยใส่หัวเชื้อ 2 มิลลิลิตร กับน้ำที่ใช้เจือจางจนได้ 1 ลิตร แต่ไม่ต้องมีน้ำตัวอย่างเช่นกัน

- วัดค่าดีไอของชุดที่ 1 ของแต่ละชุดทันทีเป็นค่า DO_0

- ชุดที่ 2 และ 3 ของแต่ละชุดนำไปบ่มที่ 20 °C ไว้สำหรับหาค่า DO_5

6. การคำนวณหาค่าบีโอดี กรณีที่มีการเจือจาง ชุดความเข้มข้นที่เจือจางนั้น ค่า DO_5

$$\text{บีโอดี (มก.O}_2\text{/ล.)} = \frac{(D_1 - D_2) - (S_1 - S_2)}{P}$$

โดยที่

$D_1 = DO_0$ ของตัวอย่าง

$D_2 = DO_5$ ของตัวอย่าง

$S_1 = DO_0$ ของหัวเชื้อ

$S_2 = DO_5$ ของหัวเชื้อ

$P =$ สัดส่วนที่ทำการเจือจาง

ตัวอย่างการคำนวณ

สมมติ DO_0 ของตัวอย่างเท่ากับ 9.13 mg/L

สมมติ DO_5 ของตัวอย่างเท่ากับ 4.27 mg/L

สมมติ DO_0 ของหัวเชื้อเท่ากับ 9.23 mg/L

สมมติ DO_5 ของหัวเชื้อเท่ากับ 6.83 mg/L

สัดส่วนที่ทำการเจือจางคือใช้น้ำตัวอย่าง 50 มล.

$$\begin{aligned} \text{จะได้ค่าบีโอดี} &= \frac{(9.13 - 4.27) - (9.23 - 6.83)}{(50/1000)} \\ &= \frac{(4.86 - 2.40)}{0.05} \\ &= 49.2 \text{ mg O}_2\text{/L} \end{aligned}$$

ก-5 การวิเคราะห์หาสภาพด่างโดยวิธีใช้อินดิเคเตอร์

1) สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน Na_2CO_3 0.01 โมลต่อลิตร หรือ 0.02 นอร์มัล

อบ Na_2CO_3 ที่ 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งมา 1.060 กรัม ละลายในน้ำ 1000 มิลลิลิตร การคำนวณความเข้มข้น Molarity ของ Na_2CO_3 = น้ำหนักที่ชั่ง (กรัม)/[มวลโมเลกุล(กรัมต่อโมล) x ปริมาตรของสารละลาย(ลิตร)]

มวลโมเลกุลของ Na_2CO_3 = 106 กรัมต่อโมล

Normality ของ Na_2CO_3 = 2 x Molarity

2. สารละลายมาตรฐาน กรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร หรือ 0.02 นอร์มัล

เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 นอร์มัล หรือ 0.5 โมลต่อลิตร จากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98%, 1.84 kg/L) ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 36 นอร์มัลหรือ 18 โมลาร์ โดยปีเปตกรดเข้มข้นมา 28.3 มิลลิลิตร ละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ปีเปตสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้ว มา 10 มิลลิลิตร ละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมี กรดซัลฟิวริก เข้มข้น ประมาณ 0.01 โมล/ลิตร หรือ 0.02 นอร์มัล

3) การทดลอง

1. การวิเคราะห์หาสภาพด่างในตัวอย่างน้ำ เลือกใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม จากตารางที่ ก-4 เพื่อที่จะใช้สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกไม่เกิน 25 มิลลิลิตร ในการไทเทรต โดยทั่วไปจะใช้ 50 มิลลิลิตรหรือ 100 มิลลิลิตร และควรใส่คลอรีนอิสระที่อาจจะมีอยู่ในตัวอย่างน้ำ โดยหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 โมล/ลิตร ลงไป 1 หยด (0.05 มิลลิลิตร)

ตารางที่ ก-4 การเลือกปริมาณตัวอย่างน้ำที่ที่เหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์สภาพด่าง

สภาพด่างของตัวอย่างน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร CaCO_3)	โมล/ลิตร ของกรดซัลฟิวริก	ปริมาณตัวอย่างน้ำที่ใช้ (มิลลิลิตร)
0-500	0.0100	100
400-1,000	0.0100	50
500-1,250	0.0250	100
1,000-2,500	0.0250	10
1,000-2,500	0.0500	100
2,000-5,000	0.0500	50
4,000-10,000	0.0500	25

2. ปิเปตหรือตวงตัวอย่างน้ำมา 100 มิลลิลิตร (หรือปริมาตรที่เหมาะสมแล้วทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์จนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่และเติมน้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่อีกใบหนึ่ง
3. หยดฟีนอล์ฟธาเลอินดิเคเตอร์ลงไปขวดละ 3 หยด ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีชมพู ไทเทรตด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 N จนกระทั่งสีชมพูหายไป (ค่าที่อ่านได้ = P1)
4. หยดเมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์ 3 หยดลงในแต่ละขวด ถ้าตัวอย่างมีสีเหลืองเรื่อ ๆ ไทเทรตต่อไปด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล กระทั่งสังเกตเห็นสีเริ่มเปลี่ยนเป็นสีส้ม โดยเทียบสีกับสีในขวดที่มีน้ำกลั่น จดปริมาตรกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล ทั้งหมดที่ใช้(รวมปริมาตรกรดที่ใช้ตั้งแต่เริ่มไทเทรตซึ่งใช้ฟีนอล์ฟธาเลอินเป็นอินดิเคเตอร์) (ค่าที่อ่านได้ = T1)

การคำนวณ

$$\text{สภาพด่างทั้งหมด(มก./ลิตร CaCO}_3\text{)} = \frac{[\text{mL H}_2\text{SO}_4\text{ที่ใช้ทั้งหมด(T)}][\text{Normality of H}_2\text{SO}_4] \times 50,000}{\text{มิลลิลิตร ของตัวอย่างน้ำ}}$$

$$\text{สภาพด่างฟีนอล์ฟธาเลอิน(มก./ลิตร CaCO}_3\text{)} = \frac{[\text{mL H}_2\text{SO}_4\text{ที่ใช้(P)}][\text{Normality of H}_2\text{SO}_4] \times 50,000}{\text{มิลลิลิตร ของตัวอย่างน้ำ}}$$

ให้ P = มิลลิลิตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรตเมื่อใช้ฟีนอล์ฟธาเลอินเป็นอินดิเคเตอร์

T = มิลลิลิตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรตทั้งหมดเมื่อใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์

ความสัมพันธ์ของสภาพด่าง

ในกรณีที่สภาพด่างของน้ำเกิดจากไบคาร์บอเนต คาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ และสมมติว่า ในตัวอย่างน้ำไม่มีกรดอ่อนทั้งในรูปของกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ เช่น Silicic acid Phosphoric acid และ boric acid และอยู่บนพื้นฐานที่ว่า ไฮดรอกไซด์และไบคาร์บอเนตจะไม่อยู่รวมกัน ทำให้เราสามารถสรุปได้ดังนี้

$$1. \text{ ถ้า } P = T, \text{ สภาพด่างไฮดรอกไซด์} = \frac{P \times (\text{Normality of H}_2\text{SO}_4) \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ}}$$

$$\text{สภาพด่างคาร์บอเนต} = 0$$

$$\text{สภาพด่างไบคาร์บอเนต} = 0$$

$$2. \text{ ถ้า } P > T/2, \text{ สภาพด่างไฮดรอกไซด์} = \frac{(2P-T)(\text{Normality of H}_2\text{SO}_4)(50,000)}{\text{มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ}}$$

$$\text{สภาพด่างคาร์บอเนต} = \frac{2(T-P)(\text{Normality of H}_2\text{SO}_4)(50,000)}{\text{มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ}}$$

$$\text{สภาพด่างไบคาร์บอเนต} = 0$$

3. ถ้า $P = T/2$, สภาพด่างคาร์บอเนต = $2P$ (Normality of H_2SO_4) (50,000)

มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ

สภาพด่างคาร์บอเนต = 0

สภาพด่างไบคาร์บอเนต = 0

4. ถ้า $P < T/2$, สภาพด่างคาร์บอเนต = $2P$ (Normality of H_2SO_4) (50,000)

มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ

สภาพด่างไบคาร์บอเนต = $(T-2P)$ (Normality of H_2SO_4)(50,000)

มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ

สภาพด่างไฮดรอกไซด์ = 0

5. ถ้า $P = 0$, สภาพด่างไบคาร์บอเนต = T (Normality of H_2SO_4)(50,000)

มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ

สภาพด่างคาร์บอเนต = 0

สภาพด่างไฮดรอกไซด์ = 0

ก-6 การวิเคราะห์หาสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด โดยใช้ TOC Analyzer

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ หาปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ หรือที่อยู่ในรูปของแข็งมีองค์ประกอบหลักต่อไปนี้

1. Sampling introduction คือ ส่วนนำสารตัวอย่างเข้าไปในระบบการวิเคราะห์ ได้แก่ Loop sampling, Syringe, Autosampler เป็นต้น
2. Reaction คือ ส่วนของการทำปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นทำการวัดเกิดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แบ่ง ได้ 2 แบบ คือ ปฏิกิริยา Wet Oxidation และ ปฏิกิริยา Combustion
3. Detection หรือ Detector คือ ส่วนที่วัดค่าเกิดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยา หรือ อ่านค่าของความเป็นกรด ที่เกิดขึ้น ซึ่งมี Detector ให้เลือกหลายแบบ เช่น Detector แบบ NDIR (Non dispersive Infrared detection) ใช้วัดเกิดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ หรือ Columetric ใช้วัดค่าความเป็นกรด เป็นต้น
4. Display คือ ส่วนรายงานผลของข้อมูลการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถรายงานอยู่ในรูปของรายงานต่างๆ เช่น เป็นข้อมูลต่างๆ เป็น กราฟ ได้ เป็นต้น หรือบันทึกข้อมูลต่างๆ

การวิเคราะห์หาปริมาณที่ไอซี ในสารตัวอย่างโดยวิธี Wet Oxidation ทำ ได้โดยทำให้สารตัวอย่างให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้แก๊สไนโตรเจนไล่คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นไปที่ Detector (NDIR) เพื่อการตรวจวัด โดยขั้นแรกจะต้องทำ การไล่ คาร์บอนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์คาร์บอน (IC) ออกไปก่อนโดยใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 5 % จากนั้นทำการออกซิไดซ์โดยใช้โซเดียมเปอร์ซัลเฟตกับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้จากการออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมเปอร์ซัลเฟต คือค่าที่ไอซี ในตัวอย่าง

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอคือน้ำเสีย เมื่อใช้สารรวมตะกอนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสาร (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอคือน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	เฟอริกคลอไรด์	พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์
300	38,400	35,200
500	36,800	32,800
750	35,200	33,600
1000	37,600	34,400

ตารางที่ ข-2 ค่าซีไอคือน้ำเสีย เมื่อใช้พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ที่แปรค่าพีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ค่าซีไอคือน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
7	34,400
8	32,800
9	31,200
10	33,600

ตารางที่ ข-3 ค่าซีไอคือน้ำเสีย เมื่อใช้สารช่วยรวมตะกอน คือแอนไอออน พอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น(มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอคือน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0.00	31,200
1.25	30,400
2.50	32,800
3.75	34,400
5.00	34,400
7.50	36,000
12.50	40,000

ตารางที่ ข-4 ค่าซีโอดี ทีไอซีและค่าอนินทรีย์คาร์บอนของน้ำเสียที่ผ่านโอโซนเนชั่น
ที่ช่วงเวลาต่างๆ

พีเอช	เวลา (นาทึ)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าทีไอซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าอนินทรีย์คาร์บอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
6	0	34,026.67	7,614	155.94
	30	26,026.67	7,250	107.02
	60	29,706.67	7,600	97.38
	90	26,186.67	7,128	140.24
	120	25,706.67	6,930	115.6
	150	23,786.67	6,848	96.54
	180	21,866.67	6,756	101.36
7	0	32,906.67	7,444	909.8
	30	24,266.67	7,410	987
	60	22,346.67	6,930	859.8
	90	29,546.67	7,024	71.3
	120	22,026.67	6,912	404.2
	150	21,546.67	6,726	280.4
	180	14,986.67	5,806	258.8
9	0	33,866.67	7,746	1,243
	30	27,466.67	7,520	902.4
	60	22,986.67	7,160	616.4
	90	22,186.67	6,910	456.4
	120	21,706.67	6,692	229.6
	150	19,626.67	5,946	270
	180	17,706.67	5,846	328

ตารางที่ ข-4 (ต่อ) ค่าซีไอดี ทีไอซีและค่าอินทรีย์คาร์บอนของน้ำเสียที่ผ่าน โอโซนชั้น
ที่ช่วงเวลาต่างๆ

พีเอช	เวลา (นาทื)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าทีไอซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าอินทรีย์คาร์บอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
11	0	31,146.67	7,680	2,242
	30	24,746.67	6,640	1,689.2
	60	23,946.67	6,556	1,846.2
	90	21,386.67	6,510	1,453.8
	120	22,346.67	6,640	1,501
	150	20,746.67	6,516	1,457.4
	180	19,146.67	6,106	1,302.4

ตารางที่ ข-5 ค่าบีไอซีของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วย โอโซนชั้น

พีเอช	เวลา	DO ₀	DO ₅		BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)
6	ก่อนบำบัด	8.48	7.59	7.57	1,800
	หลังบำบัด	8.51	6.80	6.91	3,310
7	ก่อนบำบัด	8.40	7.94	7.87	990
	หลังบำบัด	8.72	6.93	6.98	3,530
9	ก่อนบำบัด	8.60	7.86	7.92	1,420
	หลังบำบัด	8.55	6.85	6.91	3,340
11	ก่อนบำบัด	8.56	7.85	7.83	1,440
	หลังบำบัด	8.80	7.02	7.03	3,550

หมายเหตุ : อัตราส่วนการเจือจางคือ 0.05/100

ตารางที่ ข-6 ค่าความเข้มข้นในหน่วยเอมดีเอ็มไอและค่าอัลคาไลน์ตีก่อนและหลังการบำบัดด้วย
โอโซนชั้น

ทีเอช	เวลา	ค่าความเข้มข้น (AMDI)	ค่าอัลคาไลน์ตี (มิลลิกรัมต่อลิตร CaCO ₃)
6	ก่อนบำบัด	130,858	1,500
	หลังบำบัด	20,024	2,250
7	ก่อนบำบัด	144,777	7,250
	หลังบำบัด	17,434	8,000
9	ก่อนบำบัด	140,832	9,750
	หลังบำบัด	14,297	6,250
11	ก่อนบำบัด	140,190	14,000
	หลังบำบัด	15,082	12,750

ตารางที่ ข-7 ความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้ ความเข้มข้นของโอโซนที่เหลือและเกิดปฏิกิริยา
ในช่วงเวลาต่างๆ

ทีเอช	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น โอโซนที่ ผลิตได้ (กรัม)	ความเข้มข้น โอโซนที่ เหลือ (กรัม)	ความเข้มข้น โอโซน ที่เกิดปฏิกิริยา (กรัม)
6	30	3.8133	0.1440	3.6693
	60	7.6266	0.3360	7.2906
	90	11.4399	0.5760	10.8639
	120	15.2532	4.6080	10.6452
	150	19.0665	5.7600	13.3065
	180	22.8798	6.8160	16.0638
7	30	3.8133	0.0000	3.8133
	60	7.6266	0.0960	7.5306
	90	11.4399	0.3360	11.1039
	120	15.2532	1.7760	13.4772
	150	19.0665	5.0880	13.9785
	180	22.8798	8.4480	14.4318

**ตารางที่ ข-7 (ต่อ) ความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้ ความเข้มข้นของโอโซนที่เหลือและ
เกิดปฏิกิริยาที่ช่วงเวลาต่างๆ**

พีเอช	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น โอโซนที่ ผลิตได้ (กรัม)	ความเข้มข้น โอโซนที่ เหลือ (กรัม)	ความเข้มข้น โอโซน ที่เกิดปฏิกิริยา (กรัม)
9	30	3.8133	0.0480	3.7653
	60	7.6266	0.4800	7.1466
	90	11.4399	0.9120	10.5279
	120	15.2532	3.7440	11.5092
	150	19.0665	5.5200	13.5465
	180	22.8798	9.7440	13.1358
11	30	3.8133	0.2400	3.5733
	60	7.6266	0.5280	7.0986
	90	11.4399	1.6800	9.7599
	120	15.2532	2.0160	13.2372
	150	19.0665	4.2240	14.8425
	180	22.8798	6.4320	16.4478

หมายเหตุ : ความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้ ได้จากการทดลองของเจตนิพิฐและคณะ (2552)