

รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันโอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

Development of Ozone Oxidation Process for Wastewater Treatment

โดย

นาย สุเมธ ชวเดช

วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

628.551
ส043ก

สนับสนุนโดย
งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2539
ตุลาคม 2541

รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง



การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันโอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย
Development of Ozone Oxidation Process for Wastewater Treatment

โดย

นาย สุเมธ ชวเดช

วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิจัยบวร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดย

งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2539

ตุลาคม 2541

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2539 ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมีที่ให้การสนับสนุนด้วยดีในการอำนวยความสะดวกการปฏิบัติงานวิจัยนี้ โรงงานสุราแสงโสมที่ให้อนุเคราะห์น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ คุณดวงดาว สุขจิตต์, คุณจินตนา จันทร์ศิริวิไลกุล, คุณสวรรรยา แย้มสกุลนา, และคุณอัษฎรัตน์ เศรษฐนันท์ ที่ช่วยดำเนินงานการทดลองจนลุล่วงและเสร็จสมบูรณ์ คุณจินตนา ชำนาญบุญธรรม ในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กและพื้นที่ผิวเม็ดอลูมินาซึ่งใช้ในการทดลองนี้ และสุดท้ายขอขอบคุณคุณดวงดาว สุขจิตต์ ที่มีส่วนช่วยเขียนและจัดทำรายงานฉบับนี้ด้วยดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย : การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันไอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

ชื่อหัวหน้าโครงการ : รศ.ดร. สุเมธ ชวเดช

บทคัดย่อ

ไอโซนเป็นสารออกซิเดนท์ที่รุนแรงที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยและย่อยไม่ได้โดยจุลินทรีย์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์เหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบไอโซนออกซิเดชัน น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียโรงงานสุรา(น้ำกากส่า) ซึ่งถูกเจือจาง 20 เท่าก่อนใช้ คอลัมน์ไอโซนมีขนาดจุ 1.5 ลิตร เหล็กออกไซด์ถูกเตรียมบนผิวเม็ดอลูมินาซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.3 มม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 5.5 ม²/ก เหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นเฟอร์ริกออกไซด์และมีปริมาณ 0.0713 % จากผลการทดลองทั้งมีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ พบว่าการเพิ่มทั้งเวลาเก็บกักและอัตราการใช้ของไอโซนมีผลให้ประสิทธิภาพทั้งการกำจัดซีโอดีและซีเพิ่มสูงขึ้น เมื่อคอลัมน์ไอโซนบรรจุด้วยเม็ดอลูมินา ประสิทธิภาพทั้งการกำจัดซีโอดีและซีเพิ่มสูงขึ้นอย่างเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นและระยะเวลาที่ไอโซนอยู่ในคอลัมน์ยาวนานขึ้น เมื่อใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ระบบไอโซนมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะไฮดรอกซิลฟรีเรดดิคัลที่ถูกสร้างโดยตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวปฏิกิริยามากกว่าโมเลกุลไอโซน

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title : Development of Ozone Oxidation Process for Wastewater Treatment

Name of Project Leader : Assoc.Prof. Dr. Sumaeth Chavadej

Abstract

Ozone is a strong oxidant which can oxidize both biodegradable and nonbiodegradable organics. The objective of this study was to apply iron oxide as a catalyst to enhance the ozone oxidation process. The wastewater used in this study was distillery waste which was diluted 20 times before use. An ozone column had 1.5 l in volume. Iron oxide catalyst was prepared on alumina balls having 10.3 mm in diameter and 5.5 m²/g in specific surface area. The iron oxide was in the form of ferric oxide and its loading was 0.0713 %. From the experimental results of both with and without iron oxide catalyst, increases in either hydraulic retention time and ozone flowrate resulted in increasing the treatment efficiencies of both COD and colour removals. When the ozone column was packed with alumina balls, significant increases in the COD and colour reduction efficiencies were obtained since the surface area reacted and the residence time of ozone were increased. Under the presence of iron oxide as a catalyst, the ozone system gave the highest efficiencies in COD and colour removals because the hydroxyl free radical generated from the catalyst is more reactive than ozone molecule itself.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
สารบัญเรื่อง	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI

บทที่

1. บทนำ.....	1
2. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโอโซนและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การผลิตโอโซน.....	3
2.2 ปฏิริยาสลายตัวของโอโซนในน้ำเสีย.....	4
2.3 ปฏิริยาระหว่างสารประกอบอินทรีย์กับโอโซน.....	6
2.4 การประยุกต์ใช้โอโซน	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.วิธีการทดลอง	16
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	16
3.1.1 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator)	16
3.1.2 เครื่องวิเคราะห์โอโซน (Ozone Measuring Device)	19
3.1.3 เครื่องปฏิกรณ์เคมีคอลล์มันท์แก้ว (Ozone Reactor)	19
3.1.4 เครื่องทำลายโอโซน (Ozone Destructor)	19
3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิริยา	19
3.4 วิธีการทดลอง	20
3.5 การวิเคราะห์น้ำเสีย.....	21
3.4.1 การวัดค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี	21

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

3.4.2 การวิเคราะห์ค่า COD.....	21
3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบคาร์บอน (TOC)	22
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	23
4.1 น้ำกากส่า.....	23
4.2 ประสิทธิภาพระบบโอโซนไม่มีวัสดุบรรจุ... ..	24
4.2.1 ระยะเวลาระบบโอโซนเข้าสู่สภาวะคงที่	24
4.2.2 ผลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน	25
4.2.3 ผลของอัตราการไหลโอโซน.....	26
4.2.4 ผลของอัตราการไหลน้ำกากส่า.....	27
4.2.5 ผลของเวลาเก็บกักน้ำกากส่า.....	29
4.3 ประสิทธิภาพระบบโอโซนเมื่อมีวัสดุบรรจุ.....	29
4.4 ประสิทธิภาพระบบโอโซนมีวัสดุบรรจุเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา...31	
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบโอโซนมีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา...34	
4.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์.....	34
4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสี	35
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก.....	40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนซ์ต่าง ๆ	6
2.2 เวลาในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ประสิทธิภาพการกำจัด 50 % โดยใช้ คลอรีนและเปอร์แมงกาเนต.....	12
2.3 เปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้ไอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอน โลหะหนักต่าง ๆ.....	13
4.1 แสดงลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าจากโรงงานสุราแสงโสม.....	24
4.2 ลักษณะสมบัติเมื่อดอะลูมินาและตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์.....	32

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบเครื่องผลิตไอโซนสนามไฟฟ้าแรงสูง.....	3
2.2 ปฏิกริยาการเกิดไอโซนภายใต้สนามไฟฟ้า	4
2.3 ปฏิกริยาการแตกตัวไอโซนในน้ำ	5
2.4 ปฏิกริยาสลายสารฟีนอลโดยไอโซน.....	10
2.5 ปฏิกริยาเคมีไอโซนออกซิไดซ์สารเนพทาลีน	11
3.1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง.....	17
3.2 คอลัมน์ไอโซนที่ใช้ในการทดลอง.....	18
4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบไอโซนที่เวลาการทดลองต่าง ๆ เมื่อไม่มีวัสดุ บรรจุในคอลัมน์ อัตราการไหลไอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำอากาศ 75 มิลลิลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไอโซน 572 วัตต์ และ เวลาเก็บกัก 8 นาที.....	25
4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบไอโซนเมื่อไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์ที่อัตราการ ไหลไอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาเก็บกัก 8 นาที และที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ.....	26
4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบไอโซนเมื่อไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์ ที่กำลัง ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไอโซน 572 วัตต์ และเวลาเก็บกัก 8 นาที.....	27
4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบไอโซนเมื่อไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์ที่อัตราการ ไหลไอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง และกำลังไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไอโซน 572 วัตต์...	28
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลาเก็บกักต่าง ๆ ของระบบไอโซนที่ไม่มีวัสดุบรรจุ อัตราการไหลไอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำอากาศ 75 มิลลิลิตรต่อ นาที และกำลังไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไอโซน 572 วัตต์.....	29
4.6 ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีที่เวลาเก็บกักและอัตราการไหลไอโซนต่าง ๆ ของ ระบบไอโซนเมื่อมีการบรรจุเม็ดอะลูมินา 500 มิลลิลิตร	30

สารบัญรูป (ต่อ)

4.7	ผลของอัตราการไหลไอโซนและเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบไอโซนเมื่อบรรจุเม็ดอะลูมินา 500 มิลลิลิตร	31
4.8	ผลของอัตราการไหลไอโซนและเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีของระบบไอโซน เมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เกาะติดบนอะลูมินา	33
4.9	ผลของอัตราการไหลไอโซนและเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เกาะติดบนอะลูมินา	33
4.10	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีของระบบไอโซนเมื่อมีวัสดุบรรจุมีตัวเร่งปฏิกิริยา มีวัสดุบรรจุไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่มีวัสดุบรรจุ.....	35
4.11	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบไอโซนเมื่อมีวัสดุบรรจุมีตัวเร่งปฏิกิริยา มีวัสดุบรรจุไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่มีวัสดุบรรจุ	36

บทที่ 1



บทนำ

มลภาวะทางน้ำมีสาเหตุหลักมาจากการระบายน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนระบายทิ้งลงสู่แหล่งรับน้ำธรรมชาติ ระบบบำบัดชีวภาพมักนิยมประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์บางชนิดไม่สามารถถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้ก่อให้เกิดน้ำเสียมีสี เช่น น้ำเสียจาก โรงงานน้ำตาล โรงงานฟอกย้อม โรงงานเยื่อกระดาษ เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้มีสารประกอบอินทรีย์(Organic compounds) อยู่ในปริมาณสูงในรูปของ COD (Chemical Oxygen Demand) และBOD (Biochemical Oxygen Demand) กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทั่ว ๆ ไป ไม่สามารถลดสีและกำจัดสารอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลสูงหรือมีโครงสร้างซับซ้อนได้ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือวิธีการออกซิเดชัน (Chemical Oxidation) ซึ่งตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ได้แก่ คลอรีน, คลอรีนไดออกไซด์, โอโซน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, โพแทสเซียมเปอร์มังกาเนต และการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารประกอบที่คงทนและยากต่อการย่อยสลายได้ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะเกิดสารเคมีที่อันตราย ดังนั้นการใช้โอโซนได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากที่โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก (Strong oxidizing agent) และไม่เกิดสารอันตรายตกค้าง การประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกับแสงยูวีหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าได้ผลดีในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์, สารอนินทรีย์, สารที่มีพิษ, สารอินทรีย์ที่คงทนและยากแก่การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับโอโซนด้วย เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของโอโซน ประโยชน์จากงานวิจัยครั้งนี้ สามารถนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งวิธีการนี้ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนในน้ำกากส่าโดยใช้โอโซน เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อมีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ในการประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียต่อไป

หนึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการใช้สารอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้สารเหล็กไม่ก่อพิษในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

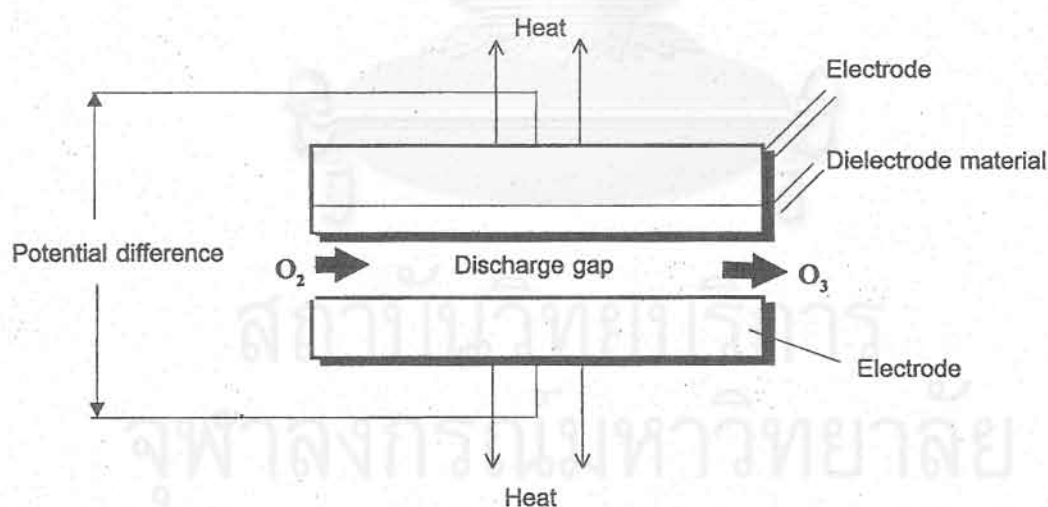
บทที่ 2



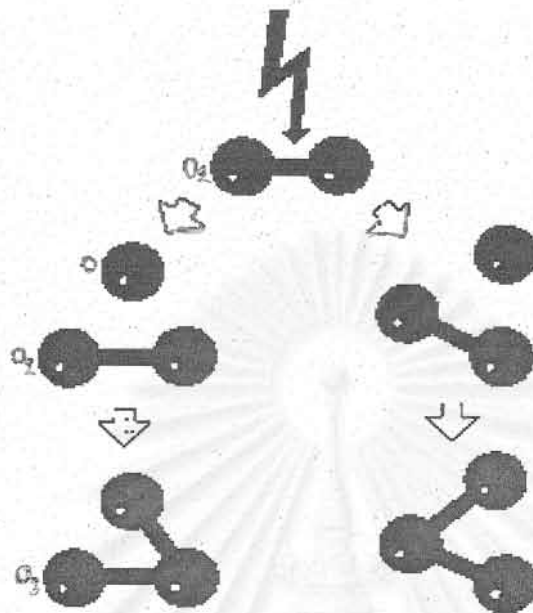
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโอโซนและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตโอโซน

โอโซนโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม โอโซนสามารถผลิตได้โดยผ่านอากาศหรือออกซิเจนในสนามไฟฟ้าแรงสูง (Dielectric barrier discharge หรือเรียกว่า Silent electrical discharge) รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของระบบผลิตโอโซน โดยโมเลกุลออกซิเจนบางส่วนจะถูกแยกออกเป็นอะตอมออกซิเจนโดยการวิ่งชนของประจุลบ (อิเล็กตรอน) จากนั้นอะตอมออกซิเจนจะไปรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนเป็นโอโซนดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตโอโซนอยู่ในช่วง 9-19 kV (Lin และ Yeh, 1993)



รูปที่ 2.1 รูปแบบเครื่องผลิตโอโซนสนามไฟฟ้าแรงสูง (Dielectric barrier discharge)
(Lin และ Yeh, 1993)



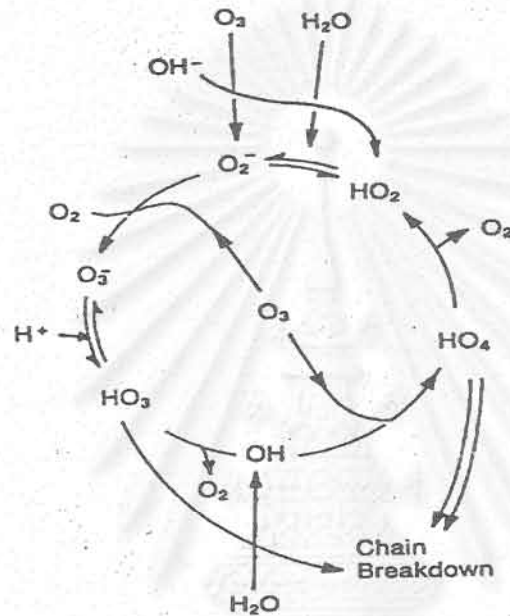
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการเกิดโอโซนภายใต้สนามไฟฟ้า

2.2 ปฏิกริยาสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร โอโซนจะสลายเป็นออกซิเจน โดยแตกตัวให้แรดดิคัลต่าง ๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$), HO_3 , HO_4 และ Super oxide (O_2^-) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แรดดิคัลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ (Strong Oxidant) ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถของสารโอโซนในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า และสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ถึง 1.3 เท่า

ในน้ำธรรมชาติ กลไกการสลายตัวของโอโซนจะซับซ้อนกว่าในน้ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้เพราะในน้ำธรรมชาติจะมีสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งอาจเป็นตัวก่อ (initiator) เช่น ฟอर्मเมต, HO_2^- , Fe^{2+} , $^{\circ}\text{OH}$ ตัว promotor เช่น ฟอर्मเมต, และ primary alcohol อาจมีสารยับยั้ง (inhibitor) เช่น คาร์บอนต, ไบคาร์บอนต และ tertiary alcohol ของการสลายตัวของโอโซน อนุมูล hydroxide ion เป็น promotor ของการสลายตัวของโอโซน ครึ่งชีวิตของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นต่าง โดยที่

pH 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติเป็นตัวทำลายโอโซน (scavenger) อื่นสามารถทำปฏิกิริยากับ $^{\circ}\text{OH}$ ดังนั้นจึงหยุดปฏิกิริยาของ radical chain reaction ที่ส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($^{\circ}\text{OH}$) และสารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติยังเป็นตัว initiator และ promotor ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนด้วย



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ (Langlais และคณะ, 1991)

ปฏิกิริยาของโอโซนกับไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือ hydroperoxide ion (OH_2^-) เริ่มด้วยการเกิดเป็น hydroxyl radical ก่อน ดังนั้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ H_2O_2 กับโอโซนจะมีประโยชน์ในการเพิ่มการเกิด $^{\circ}\text{OH}$ สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เองจะเกิดปฏิกิริยาซ้ำกับโอโซน แต่ conjugate base, OH_2^- จะรบกวนในการทำปฏิกิริยากับโอโซนมากกว่า ซึ่งส่งผลให้อัตราการสลายตัวของโอโซนในสถานะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม pH Staehelin และ Hoigne (1993) พบว่าภายใต้สภาวะที่เป็นต่างหรือเป็นกลาง อัตราการสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแสดงได้ด้วย

$$\frac{d[\text{O}_3]}{dt} = k[\text{O}_3][\text{OH}_2^-]$$

เมื่อ $k = (5.5 \pm 1.0) \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$

ส่วนกลไกการสลายตัวของโอโซนโดยใช้แสง มีนักวิทยาศาสตร์ได้ตรวจสอบและพบว่าเกิดเป็นไฮดรเจนเปอร์ออกไซด์ หลังจากนั้นไฮดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยาต่อไปโดย direct photolysis หรือ conjugate base ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็น ไฮดรอกซิลแรดดิคัล

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนท์ต่าง ๆ (Lin และ Yeh, 1993)

Compound	Oxidation potential (volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$)*	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Chlorine	1.36	1.00
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen peroxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40
Oxygen	0.40	0.29

* formed when ozone decomposes

2.3 ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบอินทรีย์กับโอโซน

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารอินทรีย์หรือที่เรียกว่า โอโซนไลซิส (Ozonolysis) แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. Direct attack โดยโมเลกุลของโอโซนโดยตรง เกิดโดย electrophilic หรือ dipolar cyclo addition

2. Indirect attack โดย free radicals ที่เกิดจากปฏิกิริยาขั้นที่ 1

ปฏิกิริยาของ free radicals จะเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาขั้นแรก ซึ่งพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เมื่อเทียบกับสารอินทรีย์และโอโซน

$$d[M]/dt = k[O_3][M]$$

เมื่อ $[M]$ = ความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์

$[O_3]$ = ความเข้มข้นโอโซนในน้ำ

k = ค่าคงที่

โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่บริเวณพันธะคู่ ($C=C$, $C=C-O-R$, $C=C-X$) หรือ อะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ nucleophilic C) สารอะโรมาติกส์ที่มีหมู่ OH, CH_3 , หรือ OCH_3 อยู่ตรงบริเวณออกโซจะเข้าทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (high reactivity) แต่ถ้ามีหมู่ NO_2 , CO_2H หรือ CHO ปฏิกิริยาจะเกิดช้า สามารถแสดงปฏิกิริยาของทั้ง 2 ขั้นได้ดังนี้



or $^{\circ}OH + \text{Products}$ (initiation step)



or $OH_2 + \text{products}$ (propagation step)

สารที่สามารถเกิดการย่อยสลายด้วยโอโซนได้ง่ายจะต้องมีค่า $k > 10^3 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ในกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลที่เกิดขึ้นมักจะถูกออกซิไดซ์ง่าย มีขั้ว หรือย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งจะไม่ทำให้ค่า Total Organic Carbon เปลี่ยนแปลง

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารลดแรงตึงผิวซึ่งพบในผงซักฟอกไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยใช้โอโซน อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนตเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิก เมื่อโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาจะเข้าทำที่วงอะโรมาติก โดยอัตราทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับโครงสร้างของหมู่ R โดยสารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิกจะถูกออกซิไดซ์ได้เร็วกว่าสารลดแรงตึงผิวที่เป็นกลาง ส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิก ยังไม่มีผู้ทำการทดลองไว้ แต่คาดว่าปฏิกิริยาค่อนข้างช้า รวมถึงสารลด

แรงดึงผิวชนิดนอนอ็อกซิก ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาก็ค่อนข้างช้าด้วย ต้องการจำนวนโมเลกุลของโอโซนมากและต้องใช้เวลาในการสัมผัสนานด้วยเพื่อที่กำจัดสารชนิดนี้ (Masten และคณะ, 1994)

ส่วนปฏิกิริยาของโอโซนกับสารประกอบที่ก่อให้เกิดสี สีที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำเกิดเนื่องจากสาร fulvic ถึงแม้ว่าจะมีอยู่ในปริมาณน้อยก็ยังคงทำให้เกิดสี สารอินทรีย์ตัวนี้จะถูกออกซิไดซ์ได้บางส่วน และมักอยู่ในรูปของคอนจูเกตของโครงสร้างอะโรมาติกส์ เพราะฉะนั้นจึงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยเริ่มแรกโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะคู่ของคาร์บอนและไนโตรเจน (C=C, N=N) และวงอะโรมาติกส์ ซึ่งทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกของวง โดยความซับซ้อนของโมเลกุลเป็นเพราะว่าสารอินทรีย์มีเดียดที่เกิดขึ้นหลายตัวซึ่งยังคงมีสีอยู่ จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยายาวนานในการที่จะกำจัดสีออกให้หมด จากตัวอย่างการกำจัดสี azoic พบว่าต้องใช้เวลา 1-2 ชั่วโมง จึงจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 500-700 นาโนเมตร ลดลง 50-80 เปอร์เซ็นต์ (Masten และคณะ, 1994)

สำหรับสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต ด้วยโครงสร้างทางเคมีของสารนี้ที่ไม่มีหมู่นิวคลีโอไฟล์ จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างช้ากับโอโซน ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับโพลีแซคคาไรด์ เริ่มแรกเกิดขึ้นโดยการแตกของพันธะ glycosidic ตามด้วยการออกซิไดซ์หมู่แอลกอฮอล์ของ free monosaccharides สุดท้ายได้เป็นอัลดีไฮด์และกรดที่เป็นโซยาว (aliphatic acid) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าทั้งปฏิกิริยาของโมเลกุลโอโซนเองและปฏิกิริยาของ hydroxyl radicals โดยเฉพาะถ้ามี radical scavengers (Masten และคณะ, 1994)

2.4 การประยุกต์ใช้ประโยชน์โอโซน

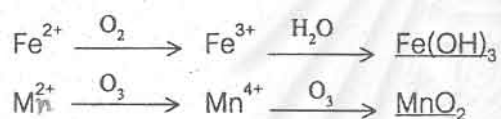
โอโซนถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการทำน้ำดื่มให้ปราศจากจุลินทรีย์ (Disinfection) นอกจากนี้โอโซนยังสามารถนำมาใช้ประยุกต์ด้านต่าง ๆ คือ

2.4.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Oxidation of Organics) ดังกล่าวมาแล้วโอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวได้รวดเร็วต่าง ๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่าง ๆ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนอาจสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างสารเคมีของสารอินทรีย์นั้น ๆ ตัวอย่างเช่น โอโซนสามารถออกซิไดซ์ฟีนอล (Phenol) ได้อย่างสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยสารฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อนึ่งสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างสลับซับซ้อนไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยโอโซน เช่น

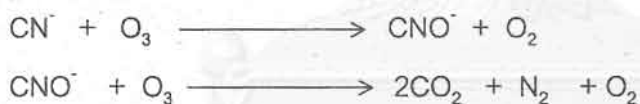
สารเนพทาไลน์ (Naphthalene) จะถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนได้ Cyclic peroxide, Oxalic acid, Oxomalonic acid, Formic acid, Orthophathadiadehyde acid, Phthalaldehydic acid, Hydrogen peroxide, Phthalic acid, และ 1,4- Naphthaquinone ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.2 แสดงประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนเปรียบเทียบกับคลอรีนและเปอร์แมงกาเนต โดยแสดงเป็นเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์เมื่อใช้โอโซนสั้นกว่าเมื่อใช้คลอรีนและเปอร์แมงกาเนตอย่างมาก

2.4.2 การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganics) โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยเปลี่ยนวาเลนซ์จากสองเป็นสามสำหรับเหล็ก ซึ่งทำให้เหล็กและแมงกานีสตกตะกอนได้ ดังแสดงในสมการเคมี

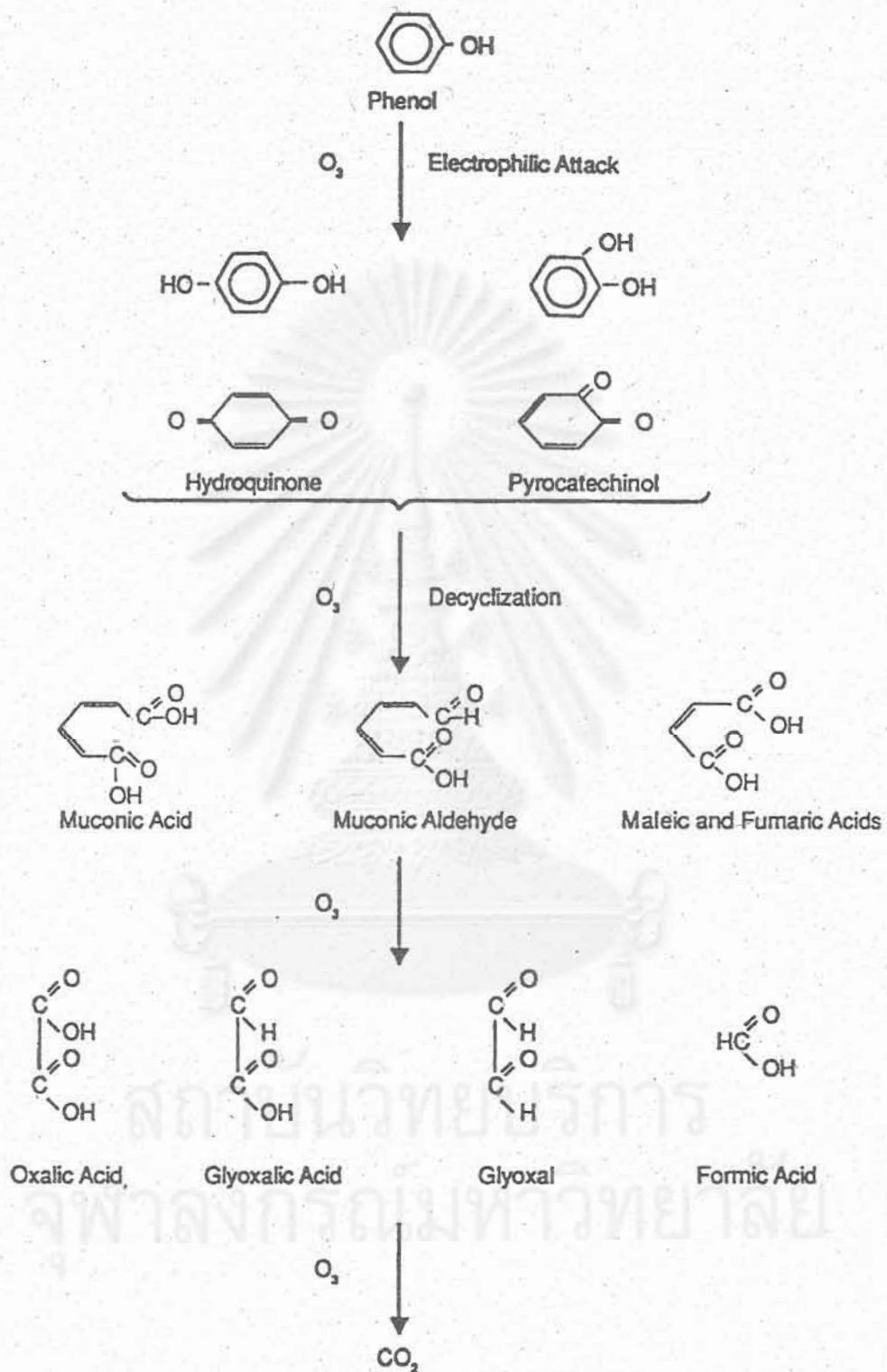


โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยาเนตจากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ได้ในโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการเคมี

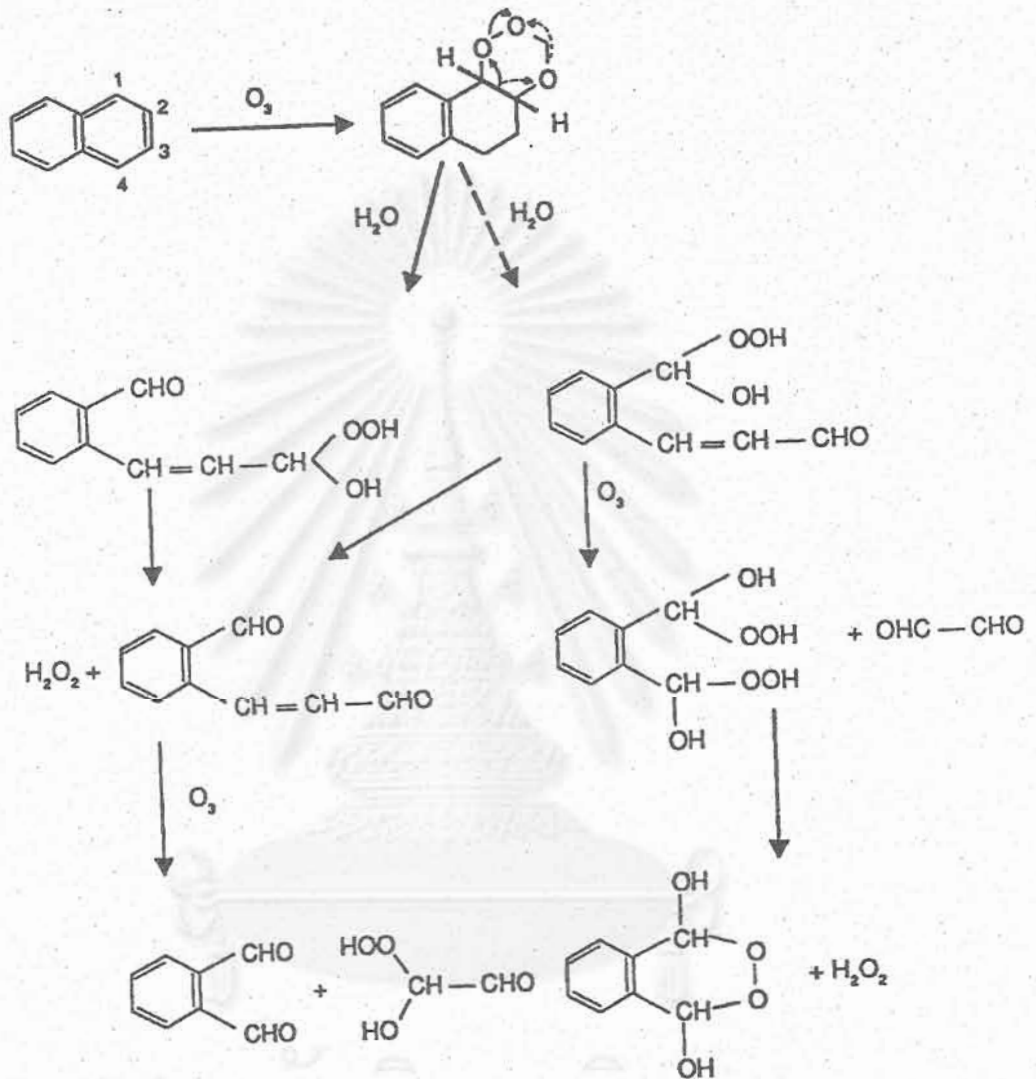


การใช้โอโซนร่วมกับต่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถลดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ต้องการในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดการใช้กรดในการปรับให้เป็นกลางลงได้ ตารางที่ 2.3 แสดงเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างลดต่ำลงเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนักต่าง ๆ

2.4.3 การควบคุมสาหร่าย (Algae Control) ปัญหาสาหร่ายมักพบในการใช้น้ำแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรมเช่น น้ำหล่อเย็น การใช้คลอรีนเพื่อทำลายสาหร่ายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตสาหร่ายพบว่าใช้ไม่ได้ผล ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวคุ้มกันเดียวกับคลอรีน การใช้โอโซนจะได้ผลดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิแดนซ์ที่รุนแรงกว่าคลอรีน (Lin และ Yeh, 1993)



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาสลายสารฟีนอลโดยโอโซน (Langlais และคณะ, 1991)



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเคมีไอโซนออกซิโดซสาร Naphthalene (Langlais และคณะ, 1991)

ตารางที่ 2.2 เวลาในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ประสิทธิภาพการกำจัด 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โอโซน, คลอรีน, และเปอร์แมงกาเนต(Lin และ Yeh,1993)

Compound	Chlorine	Permanganate	Ozone
Acetophenone	26 d	43 d	25 min
Benzaldehyde	>3.2 d	36 min	28 min
Benzothiazole	8.2 min	>5.8 d	22 min
1,2-Bis (2-chloroethoxy) ethane	> 20 d	67 d	50 min
Bis (2-chloroethyl) ether	> 20 d	15 d	21 min
Borneol	1.4 d	7 d	53 min
Camphor	> 3.2 d	> 5.8 d	>12 min
p-Dichlorobenzene	> 4.2 d	> 22 d	N/A
p-Nitrophenol	2.1 h	1.1 d	2.0 min
Methyl-m-toluate	> 20 d	22 d	5.5 min
p-Tolunitrile	> 20 d	28 d	6.4 min
Diacetone-L-sorbose	100 d	> 14 d	2.8 min
Diacetone-L-xylose	> 15 d	> 14 d	2.3 h
Toluene	N/A	N/A	2.8 min
Ethylbenzene	N/A	N/A	2.8 min
1,2,3 - Trimethylbenzene	N/A	N/A	1.9 min

2.4.4 การกำจัดสี (Colour Removal) สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี สามารถใช้โอโซนออกซิไดซ์ สารอินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งจะทำให้สีของน้ำเสียลดต่ำลงโดยโมเลกุลโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี ประสิทธิภาพการกำจัดอาจเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนักต่าง ๆ (Lin และ Yeh, 1993)

Metal	pH	
	Lime	Lime and Ozonation
Alumina	-	7.0
Cadmium	10.0	10.0
Chromium	9.0	7.0
Cobalt	11.0	9.0
Copper	9.0	7.0
Iron	4.0	4.0
Lead	-	5.1
Manganese	9.0	6.1
Nickel	11.0	10.0
Silver	11.0	10.0
Zince	10.0	9.0

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nebel และคณะ (1974) ได้ทดลองนำโอโซนมาบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นสองแล้ว (Secondary Effluents) จากโรงงานฟอกย้อมกระดาษ พบว่าสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้ และยังคงค่า COD, BOD และค่าความขุ่นลงได้

Sozanska (, 1991) นำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำจากโรงงานบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพซึ่งมาจากโรงงานผลิตกระดาษ พบว่าน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดมาแล้วด้วย Alum หรือ Lime Coagulant แล้วนำมาบำบัดอีกครั้งด้วยโอโซน จะช่วยกำจัดสีออกจากน้ำเสียได้ดีกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว และยังคงค่า COD ลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์

Kearney และคณะ (1987) ได้ทดลองนำโอโซนมาใช้ร่วมกับแสงอุลตราไวโอเล็ตบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารกำจัดวัชพืช (Herbicide Atrazine) สารนี้ไม่สามารถถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถลดความเข้มข้นของ Atrazine ลงจาก 10 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ในเวลา 30 นาที ส่วน Dugue และคณะ. (1990) ได้ใช้

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สามารถกำจัด Atrazine ได้ถึง 91 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลาเพียง 10 นาที

Hoigne และ Bader (1993) ได้ศึกษาพบว่าปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างสาร Chlorinated alkenes กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ค่า pH สูงจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิด Hydroxyl radical เร็วขึ้น การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต สามารถกำจัดสาร Chloroalkenes และ Trichloroethylene (TCE) ได้สูงกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว

Glaze และคณะ (1980) ได้ทำการทดลองพบว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต(UV) ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะช่วยเพิ่มอัตราการออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์พวก Polychlorinated biphenyls และ Trihalomethanes

Galbraith และคณะ(1992)ได้เปรียบเทียบอัตราการสลายตัวของ 1,3,5-Trichlorobenzene (TCB) โดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยตรงอย่างเดียว , O_3 /high pH, O_3/H_2O_2 , O_3/UV และ $O_3/H_2O_2/UV$ พบว่าที่ค่า pH 7 อัตราการสลายตัวของ TCB เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างเดียวช้ากว่าเมื่อใช้ UV และ H_2O_2 ร่วมด้วยถึง 3 เท่า และในสภาพที่เป็นกรด อัตราการเกิด OH^\cdot ช้า อัตราการสลายตัวของ TCB ก็ช้าด้วย

Paillard และคณะ (1991) ได้รายงานการทดลองกำจัดกรดออกซาลิก (Oxalic acid) โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับระบบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดโดยวัดในรูป TOC สูงถึง 95 % ในขณะที่ระบบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และระบบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการลดค่า TOC เท่ากับ 50 % และ 30 % ตามลำดับ

Gulyas และคณะ (1994) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระบบ UV/TiO_2 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการบำบัดน้ำเสียจากการนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ โดยน้ำเสียนี้ออกซิไดซ์ 300 มก/ล จากการทดลองพบว่า ระบบ UV/TiO_2 สามารถกำจัดออกซิไดซ์ได้สูงถึง 70 % ที่เวลากำจัด 5 ชั่วโมง ในขณะที่ระบบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กำจัดออกซิไดซ์ได้เพียง 17 % ที่เวลากำจัด 47 นาที โดยได้สรุปว่า ระบบ UV/TiO_2 มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทดลองนี้ เนื่องจากระบบ UV/TiO_2 ให้พลังงานสูงกว่าและใช้เวลากำจัดที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังสรุปว่าทั้งสองระบบมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์

Ruppert และ Bauer (1994) ได้ทำการทดลองกำจัดสาร 4-chlorophenol โดยเปรียบเทียบการใช้ UV/O_3 , UV/H_2O_2 , UV/TiO_2 และ $UV/H_2O_2/Fe^{2+}$ (photo-tenton reaction) จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสาร 4-chlorophenol เรียงตามลำดับดังนี้ $UV/H_2O_2/Fe^{2+} > UV/O_3 > UV/H_2O_2 > UV/TiO_2$

Olsen และ Barbier (1994) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนร่วมกับอัลตราโซนิก (Ultrasonic) โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้มี fulvic acid 10 มก/ล พบว่าการใช้อัลตราโซนิกสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโอโซนถึงประมาณ 10 เท่า

Adams และคณะ (1995) ได้ทำการทดลองการกำจัดสีของน้ำเสียย้อมผ้า โดยระบบต่าง ๆ ได้แก่ โอโซนอย่างเดียว, O_3/H_2O_2 , และ O_3/UV จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ระบบโอโซนอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงที่สุด การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือยูวีร่วมกับโอโซนกลับทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์ย้อมผ้าได้โดยตรง การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือแสงยูวีจะทำให้โอโซนแตกตัวให้แรดดิคัลต่าง ๆ (radicals) ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์อื่น ๆ จึงทำให้โอโซนสูญเสียไปส่วนหนึ่ง โอโซนส่วนที่เหลือที่ใช้ออกซิไดซ์ย้อมผ้าจึงมีน้อยลง

Preis และคณะ (1995) ได้ทำการทดลองกำจัดสารฟีนอล (phenol) โดยใช้โอโซน พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ทำให้ปริมาณโอโซนที่ต้องใช้ออกซิไดซ์ฟีนอลลดต่ำลง การประยุกต์ใช้แสงยูวีร่วมกับโอโซนพบว่าไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สารฟีนอล ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสารฟีนอลและโอโซนดูดกลืนแสงยูวีได้เท่าเทียมกัน จึงทำให้แสงยูวีไม่เหลือเป็นประโยชน์ในการทำให้โอโซนแตกตัวเป็น radical ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับโอโซนและแสงยูวี ซึ่งพบว่าไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารฟีนอลเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับโอโซนก็ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารฟีนอล ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์สารฟีนอลโดยตรง การเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือแสงยูวีทำให้โอโซนแตกตัวให้ free radical ต่าง ๆ จึงไม่มีความจำเป็นในกรณีโอโซนออกซิไดซ์สารฟีนอล

Schutte และคณะ (1995) ได้ทำการทดลองออกซิไดซ์น้ำเสียจากกองขยะ (Landfill leachate) โดยใช้โอโซนอย่างเดียว (O_3) , โอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (O_3/H_2O_2) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับยูวีและเหล็กไอออน ($H_2O_2/UV/Fe^{2+}$) จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพการกำจัดสีได้น้อยเพียง 38 % แต่เมื่อประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สูงสุด

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

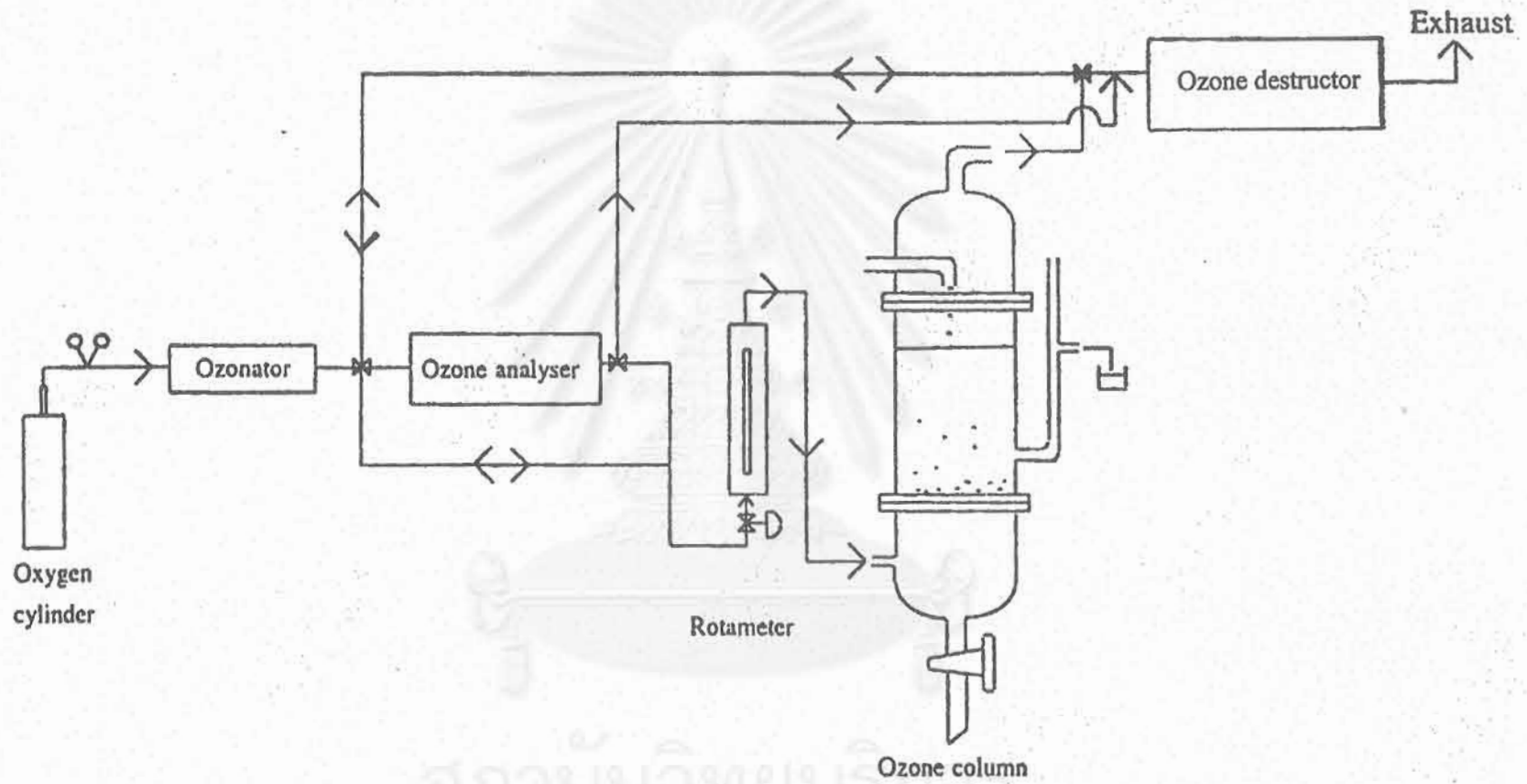


3.1 อุปกรณ์การทดลอง

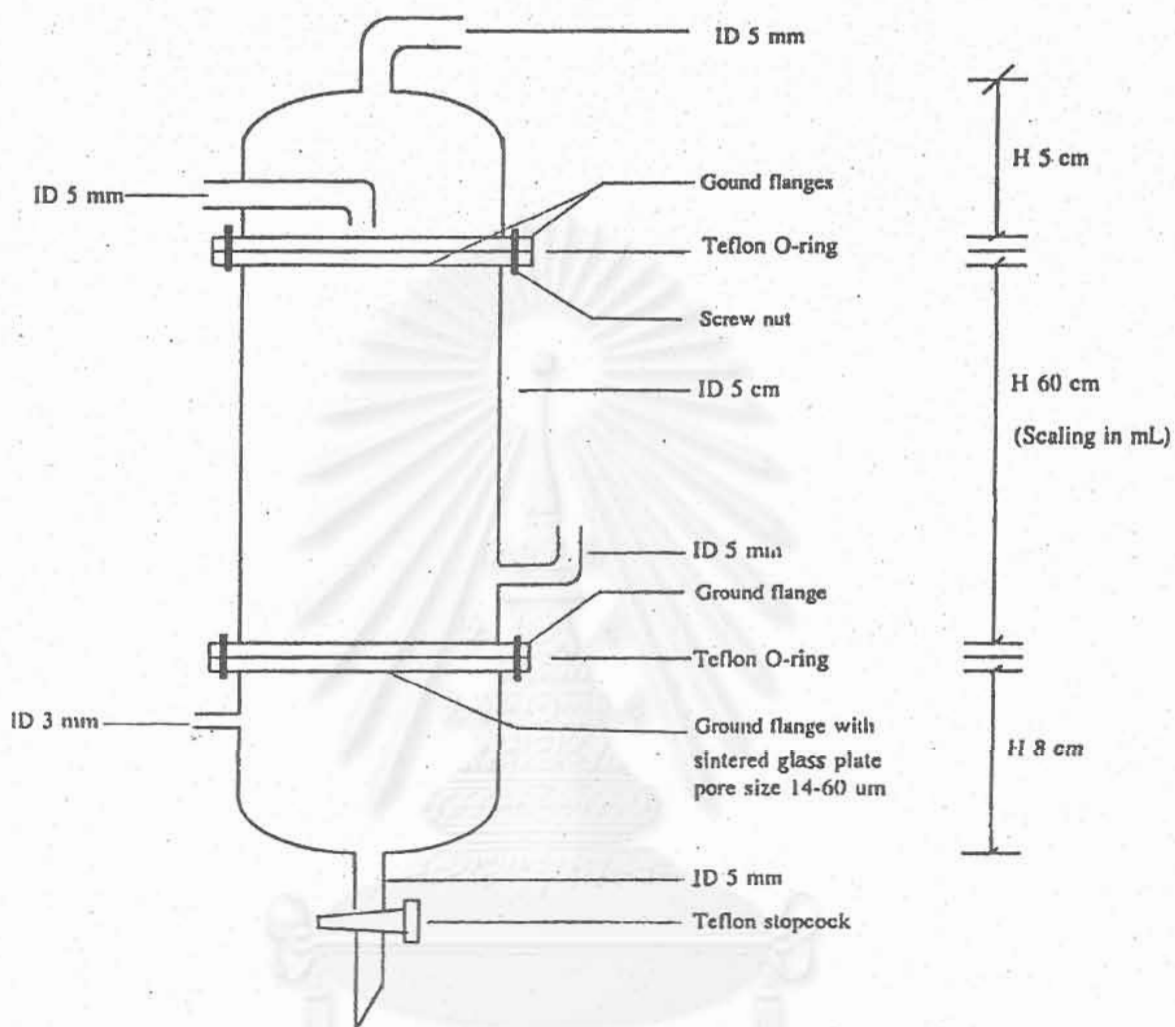
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลอง ส่วนรูปที่ 3.2 แสดงคอลัมน์ไอโซนที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยส่วนสำคัญ ๆ ได้แก่ เครื่องผลิตไอโซน (Ozone Generator), เครื่องวิเคราะห์ไอโซน (Ozone measuring device) , คอลัมน์ปฏิกิริยา (Reaction Column) และเครื่องทำลายไอโซน (Ozone destructor) รายละเอียดอุปกรณ์การทดลองนี้จะได้กล่าวต่อไป

3.1.1 เครื่องผลิตไอโซน (Ozone Generator)

ไอโซนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตจากเครื่องผลิตไอโซนยี่ห้อ OG20 มีอัตราการกำลงการผลิตสูงสุด 20 กรัมไอโซนต่อชั่วโมง ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 300 หน่วย (1,144 วัตต์) ผลิตไอโซนได้ 100 กรัมของไอโซนต่อลูกบาศก์เมตร และรับอัตราการไหลผ่านของก๊าซได้สูงสุด 200 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ก๊าซออกซิเจนในการผลิตไอโซน ก่อนเริ่มการทดลองต้องเช็คการรั่วระหว่างถังก๊าซออกซิเจน เครื่องผลิตไอโซน และเครื่องวิเคราะห์ไอโซน เพราะถ้าหากเริ่มผลิตไอโซนแล้ว สายยางช่วงนี้เกิดการรั่ว จะเกิดการรั่วไหลของไอโซนซึ่งเป็นอันตรายมาก โดยเปิดถังก๊าซออกซิเจนให้มีความดันอยู่ในช่วง 0.5 - 1 บาร์ เปิดวาล์วเริ่มต้นให้ก๊าซผ่านจากเครื่อง OG20 ไปสู่เครื่อง OM40 เมื่อหน้าปัดของเครื่อง OG20 แสดงค่าความดันประมาณ 0.5 บาร์ ให้ปิดวาล์วทางออกของก๊าซออกซิเจน ให้ก๊าซออกซิเจนอยู่ระหว่างถังก๊าซ เครื่อง OG20 และ เครื่อง OM40 จากนั้นให้สังเกตที่หน้าปัดแสดงความดันของเครื่อง OG20 ว่าคงที่หรือไม่ ถ้าคงที่แสดงว่าไม่มีรอยรั่วที่จุดใด ให้ทำการทดลองต่อไปได้ หากความดันไม่คงที่แสดงว่ามีรอยรั่วตามสายจุดใดจุดหนึ่ง จะต้องใช้น้ำสบู่เช็คว่ารั่วที่จุดใด และทำการซ่อมโดยด่วน



รูปที่ 3.1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง



หมายเหตุ ปลายท่อด้านบน และด้านข้างของ Column ที่จะต่อกับสายยาง ด้านนอกให้ทำเป็นเกลียวทึบเหมือนของ Condenser เพื่อป้องกันสายยางหลุด

รูปที่ 3.2 คอลัมน์ไอโซนที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 เครื่องวิเคราะห์โอโซน (Ozone Measuring Device)

เครื่องวิเคราะห์นี้ใช้หลักการของ UV absorption ซึ่งสามารถดูดซับโอโซนได้ในช่วง 200-300 นาโนเมตร ดังนั้นอายุการใช้งานของหลอดไฟ UV จึงเป็นส่วนสำคัญ ปกติแล้วหลอดไฟนี้มีอายุการใช้งานประมาณ 20,000 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นจะต้องเช็คอายุการใช้งานของหลอดไฟนี้เมื่อใช้งานเครื่องนี้เป็นเวลานาน ก่อนใช้งานเครื่อง OM40 นี้จะต้องปรับตั้งค่า (calibration) เครื่องก่อน โดยเปิดก๊าซออกซิเจนให้ไหลผ่าน และยังไม่เปิดเครื่อง OG20 ให้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซอ้างอิง ปรับอัตราการไหลที่เครื่อง OG20 ให้เป็น 20 ลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นเปิดเครื่อง OM40 ซึ่งขณะนี้ยังไม่มีการผลิตโอโซน ก๊าซที่เข้าเป็นก๊าซออกซิเจนอย่างเดียว จากนั้นปรับปุ่มตั้งค่าที่เครื่อง OM40 ให้อ่านค่าเป็นศูนย์

3.1.3 เครื่องปฏิกรณ์เคมีคอลัมน์แก้ว (Ozone Reactor)

คอลัมน์โอโซนที่ใช้ทำการทดลองนี้ทำมาจากท่อแก้ว มีขนาดความจุ 1.5 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ส่วนล่างของคอลัมน์บุด้วย sintered glass plate ซึ่งมีขนาดรูพรุน 14-60 ไมโครเมตร โดยให้โอโซนผ่านเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ออกสู่ด้านบน และน้ำจากฝ้าไหลลงมาจากด้านบนสู่ด้านล่าง

3.1.4 เครื่องทำลายโอโซน (Ozone Destructor)

โอโซนที่เหลือจากปฏิกิริยาจะถูกเปลี่ยนโดยตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องทำลายโอโซนให้เป็นก๊าซออกซิเจนปล่อยออกสู่บรรยากาศต่อไป

3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้คือ เหล็กออกไซด์บนผิวอลูมินา (Fe_2O_3/Al_2O_3) โดยมีอลูมินาจัดหาจากบริษัทเชนิค จำกัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 10.3 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิว 5.5 ตารางเมตร/กรัม และมีขนาดรูเล็ก (micropore diameter) 2.03 อารัมสตรอม การหาพื้นที่ผิวและขนาดรูเล็กโดยใช้เครื่องหาพื้นที่ผิวยี่ห่อ Quantachrome Autosorb-1 โดยใช้หลักการ BET (

Brunauer-Emmett-Teller method) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ เตรียมสารละลายเฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) ให้มีความเข้มข้น 100 กรัมในน้ำ 300 มิลลิลิตร จากนั้นนำเม็ดอลูมินาจำนวนประมาณ 900 เม็ดแชลงในสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทประมาณ 15 นาที แล้วนำขึ้นมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำเม็ดอลูมินานั้นไปแชแล้วอบให้แห้งซ้ำอีกครั้ง 5 ครั้ง จากนั้นนำเม็ดอลูมินาเคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรทไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (Calcination) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนเฟอร์ริกไนเตรทให้เป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) นำตัวอย่างเม็ดอลูมินา ไปหาปริมาณเหล็กออกไซด์โดยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometer ซึ่งพบว่าปริมาณเหล็กออกไซด์ในรูปของโลหะเหล็ก 0.713 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักของเม็ดอลูมินา

3.3 วิธีการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำกากส่าซึ่งเป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตสุราแสงโสม มีลักษณะมีสีน้ำตาลเข้ม โดยในการทดลองนี้น้ำกากส่ามาเจือจางด้วยน้ำที่อัตราส่วน น้ำกากส่า : น้ำ = 1 : 20 โดยปริมาตร โดยสูบน้ำกากส่าเจือจางนี้เข้าสู่คอลัมน์ทางด้านบนด้วยปั๊มสารละลายชนิดรีดสายยาง (Peristaltic Pump) เปิดก๊าซออกซิเจนให้เข้าสู่เครื่องผลิตโอโซน OG20 และผ่านเข้าเครื่องวิเคราะห์ปริมาณโอโซน OM40 ซึ่งจะต้องมีการเช็คและตั้งค่าเครื่องเหล่านี้ก่อนดังที่กล่าวแล้วข้างต้นในหัวข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 ปรับอัตราการกระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลของก๊าซที่เครื่อง OG20 และเครื่อง OM40 ให้สอดคล้องกัน จากนั้นโอโซนจากเครื่อง OG20 จะผ่านเข้าเครื่อง OM40 ผ่านเข้าสู่คอลัมน์ทางด้านล่างสวนทางกับการไหลของน้ำกากส่าอย่างต่อเนื่อง หลังจากทีโอโซนออกจากคอลัมน์แล้วจะเข้าสู่เครื่องทำลายโอโซน (Ozone Destructor) เพื่อเปลี่ยนโอโซนที่เหลือให้เป็นก๊าซออกซิเจน และปล่อยสู่บรรยากาศ ก่อนที่ก๊าซจะผ่านเข้าเครื่อง OM40 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโอโซน จะต้องมีตัวดักน้ำ (water trap) เพื่อดักน้ำที่อาจจะติดไปกับก๊าซ ซึ่งจะ ทำให้เครื่อง OM40 เสียหายได้ โดยระบบการทดลองนี้สามารถปรับเปลี่ยนวาล์วเพื่อให้สามารถวัดปริมาณโอโซนก่อนและหลังจากออกจากคอลัมน์ ส่วนการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ลงในคอลัมน์ปริมาณ 500 มิลลิลิตร สำหรับการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีตัวตุบบรรจุนั้นใช้อลูมินาบรรจุในคอลัมน์เพียงอย่างเดียว

ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ คือ อัตราการไหลของโอโซน อัตราการไหลของน้ำกากส่า ปริมาณโอโซน กำลังไฟฟ้าที่เครื่องผลิตโอโซน และเวลาในการเก็บกัก (contact

time) รวมถึงการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาลงในคอลัมน์ด้วย เก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังการทดลองที่
 สภาพต่าง ๆ เพื่อไปวิเคราะห์ค่า COD, TOC และค่าการดูดกลืนแสงเพื่อวัดประสิทธิภาพการ
 กำจัดสีต่อไป

3.4 การวิเคราะห์น้ำเสีย

3.4.1 การวัดค่าเปอร์เซ็นต์การขจัดสี

นำน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มาแยกสารแขวนลอยโดยเครื่องเหวี่ยง(centrifuge) ที่
 ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 15 นาที ดูดเอาน้ำส่วนใส 1.0 มิลลิลิตร เจือจาง
 ด้วยสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ปริมาตร 9 มิลลิลิตร วัดความเข้มข้นของสีโดยนำไป
 อ่านค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์การขจัดสี} = \frac{(A - B) \times 100}{A}$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการทดลอง

B = ค่าการดูดกลืนแสงหลังการทดลอง

3.4.2 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD)

การวัดปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสียใช้วิธีซีโอดี (Chemical Oxygen
 Demand) ซึ่งค่าซีโอดีที่ตรวจวัดได้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้งที่
 ย่อยสลายได้และไม่ได้โดยแบคทีเรีย การวิเคราะห์โดยการรีฟลักซ์ด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต ทั้งนี้
 เพราะสารนี้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีกว่าตัวอื่น ๆ ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย และมีอำนาจในการออกซิไดซ์สูง

รีฟลักซ์ตัวอย่างน้ำเสียด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต 0.25 โมลาร์และกรดซัลฟูริกเข้มข้น เป็น
 เวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณไดโครเมตบางส่วนจะถูกใช้ไปในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และจะมีปริมาณ
 ส่วนที่เหลือหลังจากทำปฏิกิริยา ซึ่งถ้านำไปไตเตรทกับเฟอร์ริสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 โมลต่อลิตร
 ใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ จะทำให้ทราบถึงปริมาณของไดโครเมตส่วนที่เหลือ เมื่อหักออกจาก
 ปริมาณที่ใส่ไปทั้งหมด (ทราบโดยการไตเตรทแบบลงค้กับเฟอร์ริสแอมโมเนียมซัลเฟต) จะทราบ
 ปริมาณไดโครเมตส่วนที่ถูกใช้ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ ซึ่งจะเท่ากับปริมาณออกซิเจน ก็

จะทราบค่า COD ของตัวอย่างได้ อีกวิธีที่ทำได้โดยง่ายคือนำตัวอย่างที่ได้จากการรีฟลักซ์ไปวัดค่า COD ด้วยเครื่อง DR/2000 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร โปรแกรม 440 ในการทดลองนี้ได้ใช้วิธีวัดค่าการดูดกลืนแสง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการที่รวดเร็วและใช้สารเคมีน้อยกว่าการไตเตรทมาก นอกจากนี้ค่าที่ได้ยังมีความถูกต้องทัดเทียมกับแบบไตเตรท

3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (TOC)

การวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน(Total Organic Carbon) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วัดปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ โดยวัดในรูปธาตุคาร์บอน โดยนำน้ำตัวอย่างผ่านเข้าไปในคอลัมน์ซึ่งถูกทำให้ร้อนเพื่อเผาทำลาย สารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน, รั้งสีอุลตราไวโอเล็ต และตัวออกซิแดนท์ เพื่อที่จะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกวัดความเข้มข้น เครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลองนี้ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น TOC-5000A

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งได้เป็น 3 ช่วงการทดลองได้แก่ การทดลองแรกเป็นการหาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบไอโซนโดยไม่มีการบรรจุตัวกลางในคอลัมน์ ส่วนการทดลองที่สองมีการบรรจุตัวกลางแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการทดลองที่สามมีการบรรจุตัวกลางที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อมูลการทดลองทั้งหมดได้แสดงในภาคผนวกท้ายรายงานฉบับนี้

4.1 น้ำกากส่า

น้ำกากส่า (slop) เป็นน้ำทิ้งที่ออกจากหอกลิ้น โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักสุรา ได้แก่ กากน้ำตาล (sugar cane molasses) ในน้ำกากส่าพบว่ามีปริมาณความเข้มข้นสูงทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเกิดจากสาร caramel สารนี้เกิดจากปฏิกิริยา polymerization ในกระบวนการผลิตน้ำตาล เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงแต่ไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอน โดยทั่วไปเรียกสารประกอบพวกนี้ว่า brown melanoidin สาร melanoidin จะอยู่ในสภาพคอลลอยด์และมีประจุลบ

สีของน้ำกากส่าเกิดจากสีของกากน้ำตาล ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย สารที่ก่อให้เกิดสีได้แก่ คาราเมล (caramel) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากน้ำตาลได้รับความร้อนมากเกินไปในระหว่างการผลิตน้ำตาลทราย คาราเมลมีสีน้ำตาลเข้ม ส่วนมากใช้ประโยชน์ในการทำเป็นส่วนผสมที่ทำให้เกิดสีในอาหารเช่น ซีอิ๊ว ซีอิ๊วปรุงรสสุรา และเครื่องดื่มต่าง ๆ เป็นต้น

เมลานอยดิน (melanoidin) เป็นสารประกอบที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning or maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ กับสารประกอบไนโตรเจน เช่น กรดอะมิโน จากการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลโดยวิธีอิเล็กโตรไลซิสพบว่าเมลานอยดินมีประจุลบ

ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้สรุปได้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่ามีความ COD และ BOD สูงมาก นอกจากนี้ยังมีปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ สูงอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปแตสเซียมและซัลเฟต

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าจากโรงงานสุราแสงโสม จ. นครปฐม

คุณลักษณะของน้ำกากส่า	ปี 2520	ปี 2529	ปี 2535	ปี 2536
Temperature (C)	95-100	-	95-100	-
pH	4.5	4.65	5.7	4.11
BOD (mg/l)	35,000	38,440	31,600	-
COD (mg/l)	100,000	100,000	106,500	112,500
Total Solid (mg/l)	10,500	9,940	78,300	-
SS (mg/l)	1,500	-	4,000	5,130
DS (mg/l)	-	97,182	38,300	-
Total Nitrogen (mg/l)	1,000	28,300	1,900	1,340
K ⁺ (mg/l)	5,000	5,680	13,330	10,000
P (mg/l)	85	91	271	55.6
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	4,440	5,680	2,400	5,525
Na ⁺ (mg/l)	120	-	-	5,000
Ca ⁺ (mg/l)	1,680	1,840	700	-

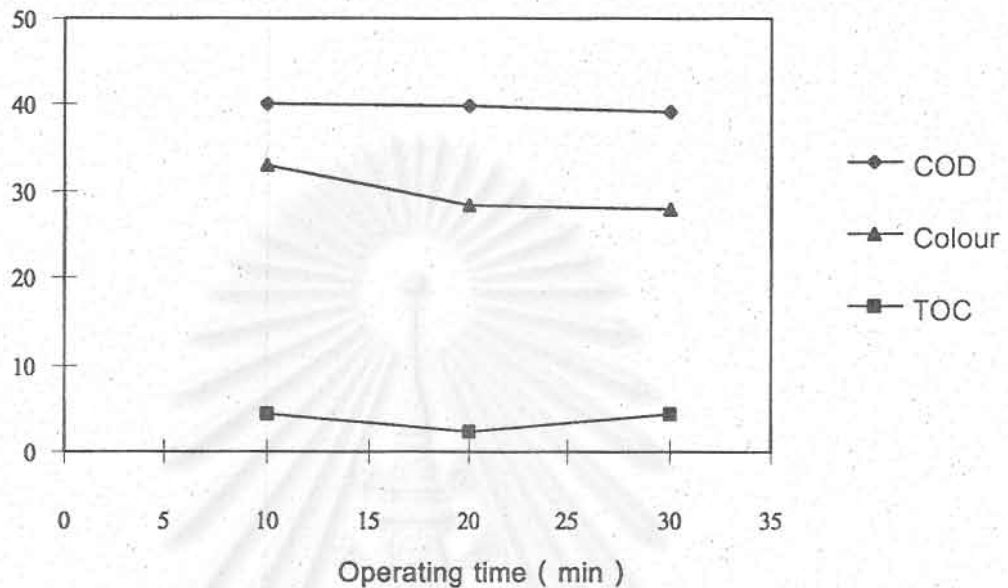
ที่มา : ฝ่ายเทคนิคบริษัทสุราทิพย์ และ กรมวิทยาศาสตร์

4.2 ประสิทธิภาพระบบไอโซนเมื่อไม่มีวัสดุบรรจุ

4.2.1 ระยะเวลาระบบไอโซนเข้าสู่สภาวะคงที่

ในการทดลองนี้เป็นการหาเวลาที่ระบบไอโซนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) รูปที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดี, การกำจัดสี และการลดค่าทีไอซี (TOC) ที่เวลาทดลองต่าง ๆ โดยระบบไอโซนเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) ซึ่งจะเห็นว่าที่เวลาผ่านไป 10, 20 และ 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าระบบไอโซนเข้าสู่สภาวะคงที่หรือเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ดังนั้นในการ

% Removal Efficiency



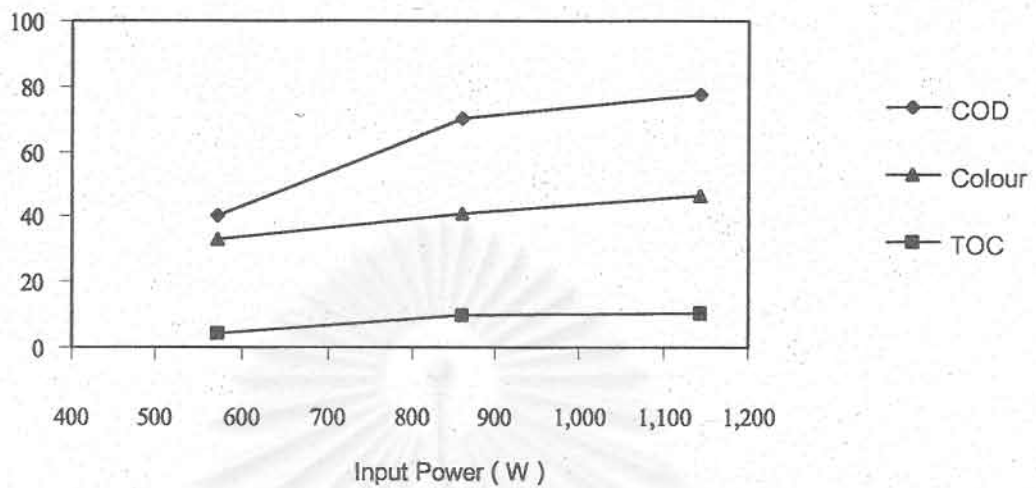
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโอโซนที่เวลาการทดลองต่าง ๆ เมื่อไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์ อัตราการไหลโอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของน้ำกากส่า 75 มิลลิลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน 572 วัตต์ และเวลาเก็บกัก 8 นาที

ทดลองต่อไปจะใช้เวลาในการทดลองที่ 10 นาที เพื่อเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์และสี

4.2.2 ผลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซนต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ ได้ทำการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซนในช่วง 500 - 1200 วัตต์ โดยเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าก็จะเป็นการเพิ่มปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ ซึ่งการเพิ่มปริมาณโอโซนทำได้ 2 วิธีคือ การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน หรือเพิ่มอัตราการไหลของโอโซน รูปที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่า COD, TOC, และการกำจัดสีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าจาก 572 W เป็น 860 W แสดงว่าสารประกอบอินทรีย์ในน้ำกากส่าถูกทำลายด้วยโอโซนได้มากขึ้น เพราะว่ามีปริมาณ

% Removal Efficiency

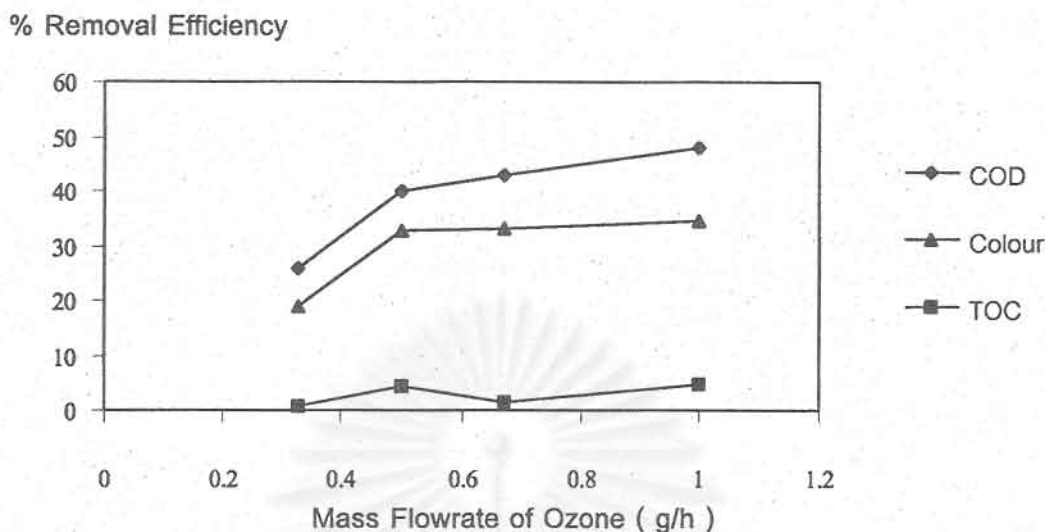


รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโอโซน เมื่อไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์ ที่อัตราการไหลของโอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาในการเก็บกัก 8 นาที และที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

โอโซนมากขึ้น โอโซนจึงออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าจาก 860 W เป็น 1,150 W พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและทีไอซีและประสิทธิภาพการกำจัดสีคงที่ไม่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ได้ถูกทำลายไปหมดแล้ว สารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ไม่อาจถูกออกซิไดส์ได้ต่อไป ดังนั้นการเพิ่มโอโซนมากขึ้นจึงไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสี

4.2.3 ผลของอัตราการไหลของโอโซนต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ในการทดลองนี้ได้กำหนดค่าต่าง ๆ คงที่ได้แก่ กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซนเท่ากับ 572 วัตต์ และเวลาในการเก็บกักน้ำกากส่าเท่ากับ 8 นาที โดยการควบคุมอัตราการไหลน้ำกากส่าคงที่ที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นทำการแปรอัตราไหลก๊าซออกซิเจนเข้าเครื่องกำเนิดโอโซน จากความเข้มข้นโอโซนที่วัดได้จากเครื่องวัดปริมาณได้นำมาคำนวณหาค่าอัตราการไหลของโอโซน แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดกับอัตราการไหลก๊าซโอโซนดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดในรูปการลดสารอินทรีย์(ซีไอดี)และสีมีความสอดคล้องกัน ส่วนการลดปริมาณสารอินทรีย์วัดในรูป TOC ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อมี

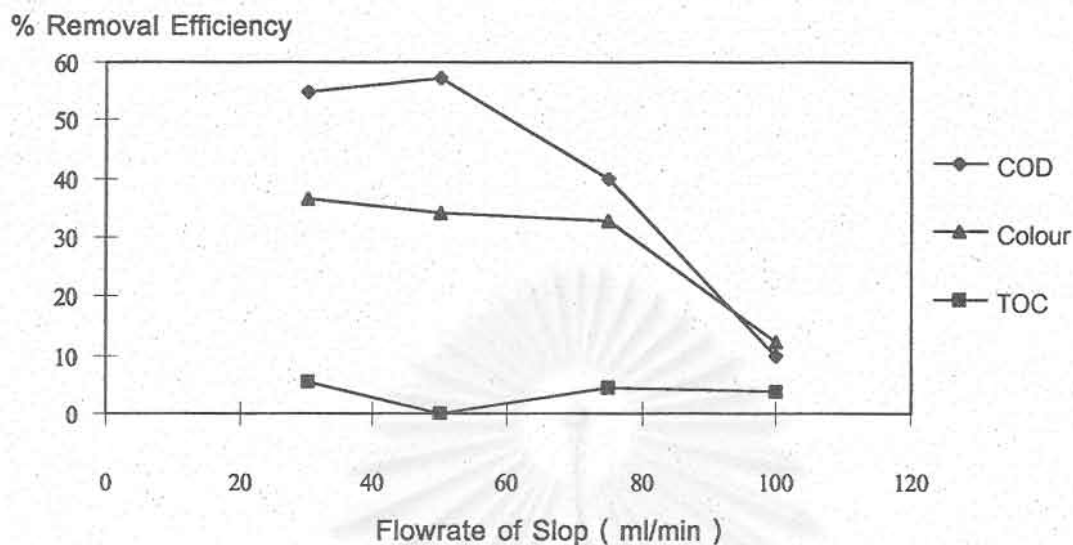


รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโอโซนที่อัตราการไหลของโอโซนต่าง ๆ เมื่อไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์ ที่กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน 572 วัตต์ และเวลาเก็บกัก 8 นาที

การเพิ่มปริมาณโอโซน สำหรับกรณีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสี พบว่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเพิ่มปริมาณโอโซนจาก 0.3 กรัม/ชั่วโมง เป็น 0.5 กรัม/ชั่วโมง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณโอโซนจาก 0.5 กรัม/ชั่วโมง เป็น 1 กรัม/ชั่วโมง ปรากฏว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการเพิ่มกำลังไฟฟ้าระบบผลิตโอโซน ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า สารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเปลี่ยนแปลงไป ส่วนสารอินทรีย์ที่เหลือจะถูกออกซิไดซ์ยากและบางส่วนจะไม่ถูกออกซิไดซ์ จึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงหลังจากการเพิ่มปริมาณโอโซนเข้าสู่ระบบ

4.2.4 ผลของอัตราการไหลของน้ำกากส่าต่อประสิทธิภาพการบำบัด

รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีที่อัตราการไหลน้ำกากส่าต่าง ๆ โดยเมื่ออัตราการไหลของน้ำกากส่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี และการกำจัดสีลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาในการสัมผัสกันระหว่างโอโซนกับสารประกอบอินทรีย์ในน้ำกากส่าลดลง จึงทำให้การทำปฏิกิริยาลดต่ำลง หรืออาจอธิบายได้ว่าเป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำกากส่า



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโอโซนที่อัตราการไหลน้ำกากส่าต่าง ๆ
เมื่อไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์ ที่อัตราการไหลของโอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง
และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน 572 วัตต์

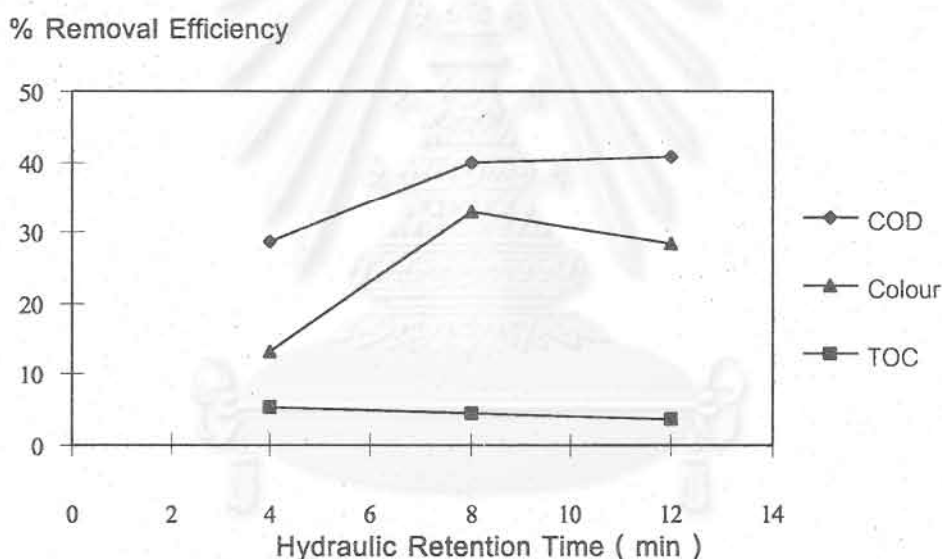
ก็เท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณสารประกอบอินทรีย์ ในขณะที่อัตราการไหลของโอโซนคงที่ ดังนั้นจึงทำให้สารประกอบอินทรีย์อยู่ในน้ำกากส่ามากขึ้น

อนึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปทีโอซี (TOC) พบว่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลทั้งโอโซนและน้ำกากส่าดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ในน้ำกากส่าถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนไปเป็นสารอินทรีย์อื่น ๆ ซึ่งยังคงสามารถวิเคราะห์ในรูปทีโอซีได้ แต่ส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์ที่ได้จากออกซิไดซ์ไม่สามารถตรวจวัดในรูปทีโอซีได้นั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของโอโซนกับผลของความเข้มข้นของน้ำกากส่า จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของโอโซนเพิ่มขึ้น 1 เท่า ประสิทธิภาพการลดค่า COD เพิ่มขึ้นน้อยกว่า เมื่อลดความเข้มข้นของน้ำกากส่าลง 1 เท่า แสดงให้เห็นว่า ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำกากส่ามีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD มากกว่าผลของความเข้มข้นของโอโซน

4.2.5 ผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพการบำบัด

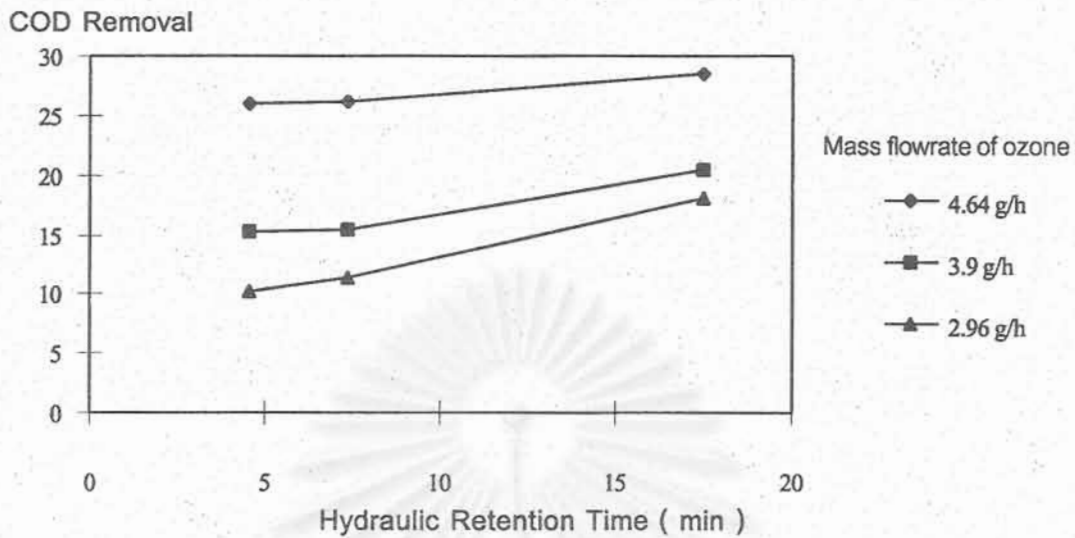
ในการทดลองนี้ได้ควบคุมอัตราการไหลทั้งของโอโซนและน้ำอากาศที่ 15 ลิตร/ชั่วโมง และ 75 มิลลิลิตร/นาที ตามลำดับ ส่วนเครื่องกำเนิดโอโซนถูกควบคุมที่ 572 วัตต์ การแปรเปลี่ยนเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention time) น้ำอากาศ กระทำโดยแปรเปลี่ยนปริมาตรคอลัมน์ ให้ได้เวลาการเก็บกัก 4, 8, และ 12 นาที รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีที่เวลาเก็บกักต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การลดค่าซีโอดี และการขจัดสี เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเวลาเก็บกักสูงขึ้นจาก 4 นาทีเป็น 8 นาที แต่เมื่อเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้นจาก 8 นาทีเป็น 12 นาทีกลับไม่เพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปแบบที่ไอซีกกลับไม่เปลี่ยนแปลงเลย เมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักสูงขึ้น เหตุผลอธิบายเช่นเดียวกับกรณีเพิ่มอัตราการไหลโอโซนและน้ำอากาศ



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลาเก็บกักต่าง ๆ ของระบบโอโซนที่ไม่มีวัสดุบรรจุในคอลัมน์, อัตราการไหลของโอโซน 15 ลิตรต่อชั่วโมง, อัตราการไหลของน้ำอากาศ 75 มิลลิลิตรต่อนาที และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน 572 วัตต์

4.3 ประสิทธิภาพของระบบโอโซนเมื่อมีวัสดุบรรจุ

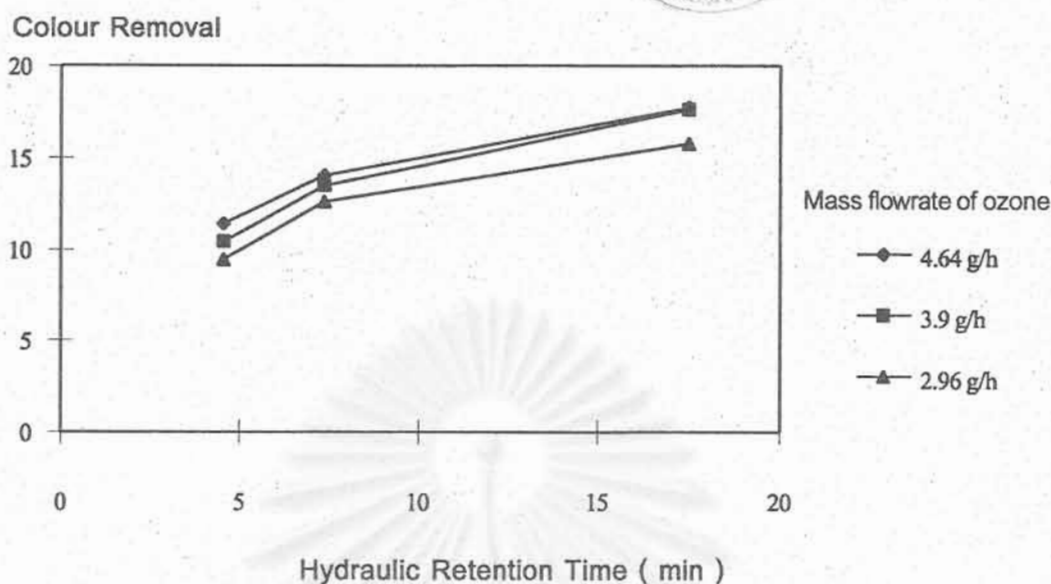
ในการทดลองส่วนนี้จะบรรจุวัสดุ (packing materials) ลงในคอลัมน์ด้วยเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารอินทรีย์ในน้ำอากาศในคอลัมน์ วัสดุที่ใช้บรรจุ



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการลดค่า COD ที่เวลาเก็บกักและอัตราการไหลโอโซนต่าง ๆ ของระบบโอโซนเมื่อมีการบรรจุเม็ดอะลูมินาปริมาตร 500 มิลลิลิตร

คือเม็ดอะลูมินาซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 10.34 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิว 5.5 ตารางเมตร/กรัม รูปที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่เวลาเก็บกักต่าง ๆ และที่อัตราการไหลโอโซนต่าง ๆ จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลโอโซนหนึ่ง เมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักจาก 4.5 เป็น 7.4 และ 17.5 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีเพิ่มสูงขึ้น โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเกือบคงที่ ซึ่งสังเกตเห็นได้จากเส้นกราฟเกือบเป็นเส้นตรง เช่นกันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลโอโซนสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วน แต่เมื่อเปรียบเทียบผลพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลโอโซนจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงกว่าการเพิ่มเวลาเก็บกัก ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรงสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเพิ่มเวลาเก็บกักจึงมีผลต่อประสิทธิภาพไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มอัตราการไหลโอโซน

รูปที่ 4.7 แสดงผลของอัตราการไหลโอโซนและเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ซึ่ง จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลโอโซนหรือเพิ่มเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพิ่มสูงขึ้น แต่ การเพิ่มอัตราการไหลโอโซนมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การเพิ่มเวลาเก็บกักสามารถทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า ผลการทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่า สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีถูกออกซิไดซ์ค่อนข้างยาก ดังนั้นการเพิ่มเวลาเก็บกักซึ่ง เท่ากับการเพิ่มเวลาทำปฏิกิริยาจึงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีได้ดีกว่าในกรณีที่เพิ่มอัตราการไหลโอโซน



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลโอโซนและเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบโอโซนเมื่อบรรจุเม็ดอลูมินาในคอลัมน์ 500 มิลลิลิตร

4.4 ประสิทธิภาพของระบบโอโซนเมื่อมีวัสดุบรรจุเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้คือเหล็กออกไซด์เกาะติดบนเม็ดอลูมินาบรรจุในคอลัมน์ โดยปริมาตรของเม็ดอลูมินาเท่ากับ 500 มิลลิลิตร ดังได้กล่าวมาแล้วขนาดของเม็ดอลูมินาเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 10.34 มิลลิเมตร ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะสมบัติเม็ดอลูมินาและเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนผิวเม็ดอลูมินา โดยวิธีเคลือบเหล็กออกไซด์บนผิวเม็ดอลูมินาได้กล่าวแล้วในบทที่ 3 ซึ่งใช้วิธี Thermal Reduction โดยเปลี่ยนเฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) ให้เป็น Fe_2O_3 ที่อุณหภูมิ 900°C จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเหล็ก (Iron load) เท่ากับ 0.0173 % โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักเม็ดอลูมินา เมื่อนำวัสดุที่เคลือบมาวิเคราะห์พบว่ามีปริมาณเหล็ก (Fe content) 45.06 % ซึ่งเมื่อคำนวณเป็น Fe_2O_3 จะได้เท่ากับ 83.7 % ดังนั้นองค์ประกอบที่เหลืออีก 16.3 % น่าจะเป็นน้ำที่รวมตัวกับเหล็กออกไซด์

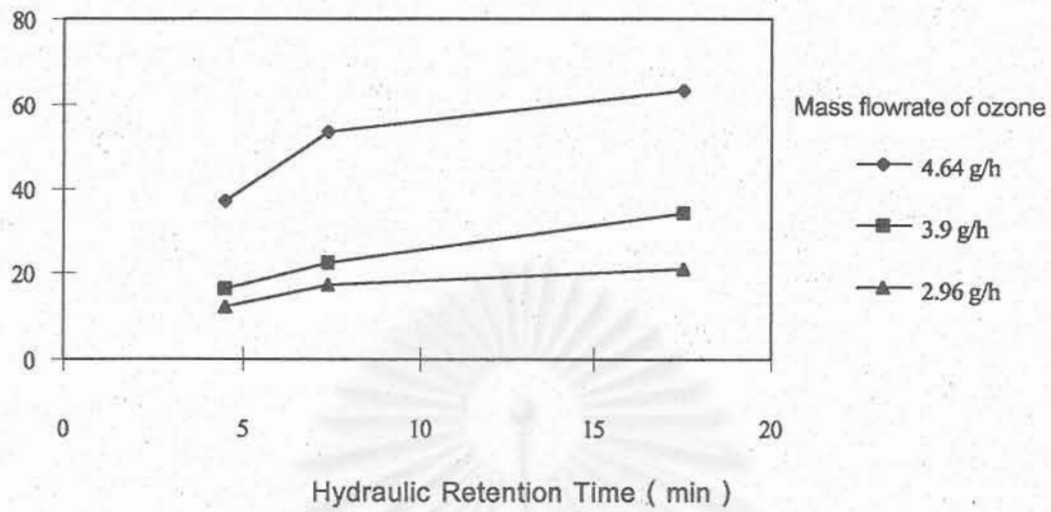
ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติเม็ดอลูมินาและตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์

<p><u>Uncoated alumina balls</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - range of diameter - average diameter - average pore diameter - specific surface area - crystal form 	<p>9.8 - 11.0 nm</p> <p>10.34 mm</p> <p>2.03 A</p> <p>5.5 m²/g</p> <p>α Al₂O₃</p>
<p><u>Coated alumina balls</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Fe content (based on dried alumina ball) 	<p>0.0713 %</p>
<p><u>Coating material</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fe composition - Calculated content of Fe₂O₃ 	<p>45.06 %</p> <p>83.7 %</p>

รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอไลท์ที่อัตราการไหลไอโซนต่าง ๆ และเวลาเก็บกักต่าง ๆ ผลการทดลองนี้มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับการทดลองที่บรรจุคอลัมน์ด้วยเม็ดอลูมินาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือประสิทธิภาพการลดซีโอไลท์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาเก็บกักสูงขึ้นและอัตราการไหลไอโซนเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มอัตราการไหลไอโซนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไลท์สูงกว่าการเพิ่มเวลาเก็บกัก

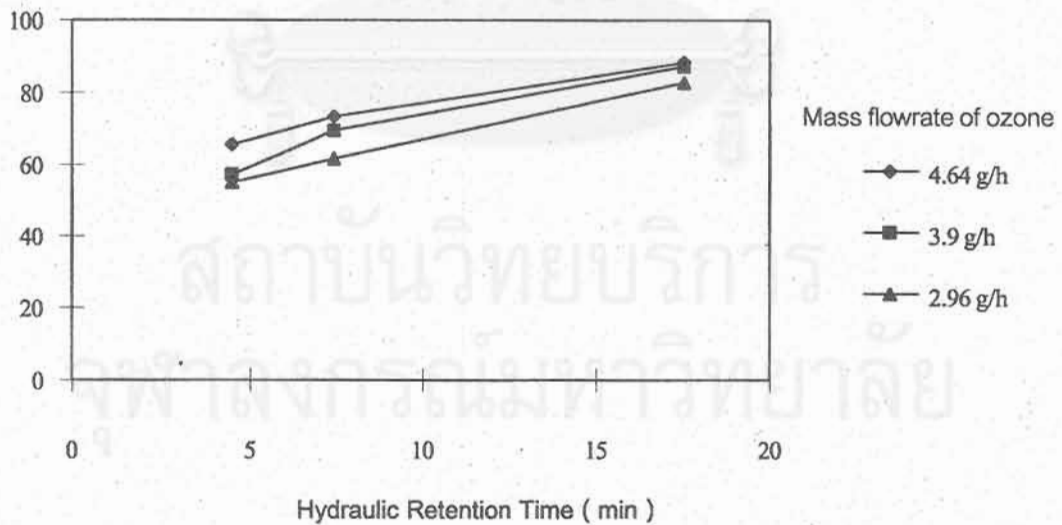
รูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไลท์ที่เวลาเก็บกักและอัตราไหลไอโซนต่าง ๆ เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไลท์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาเก็บกักยาวนานขึ้นและอัตราการไหลไอโซนสูงขึ้น โดยการเพิ่มเวลาเก็บกักมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไลท์มากกว่าการเพิ่มอัตราไหลไอโซน

COD Removal



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราการไหลโอโซนและเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพการลดค่า COD ของระบบโอโซน เมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เกาะติดบนอลูมินา

Colour Removal

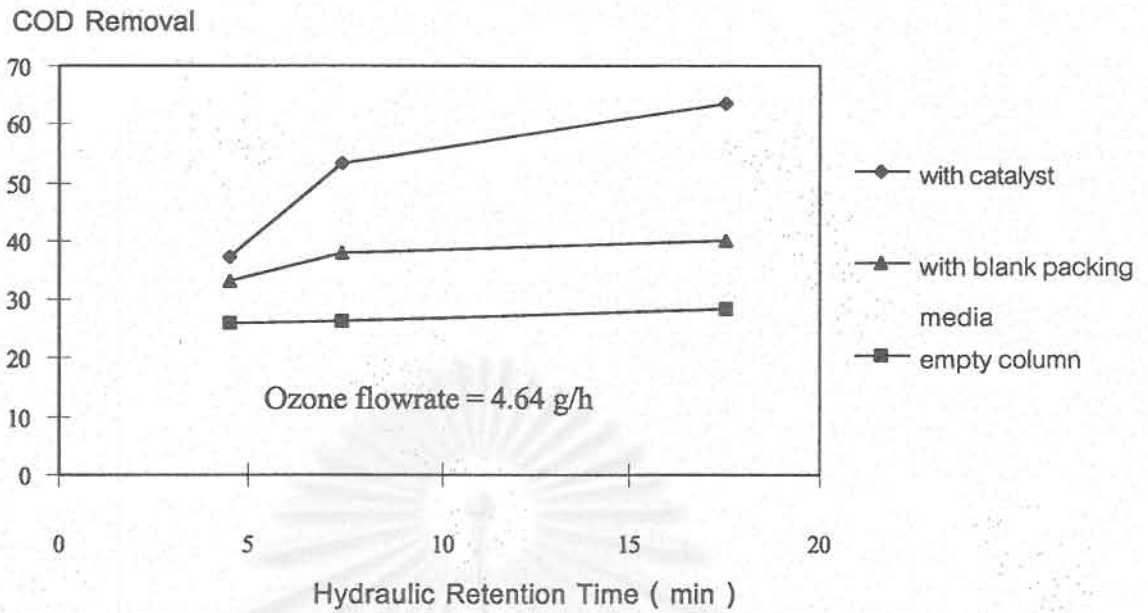


รูปที่ 4.9 ผลของอัตราการไหลของโอโซนและเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี เมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเหล็กเกาะติดบนอลูมินา

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบไอโซนมีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์

4.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

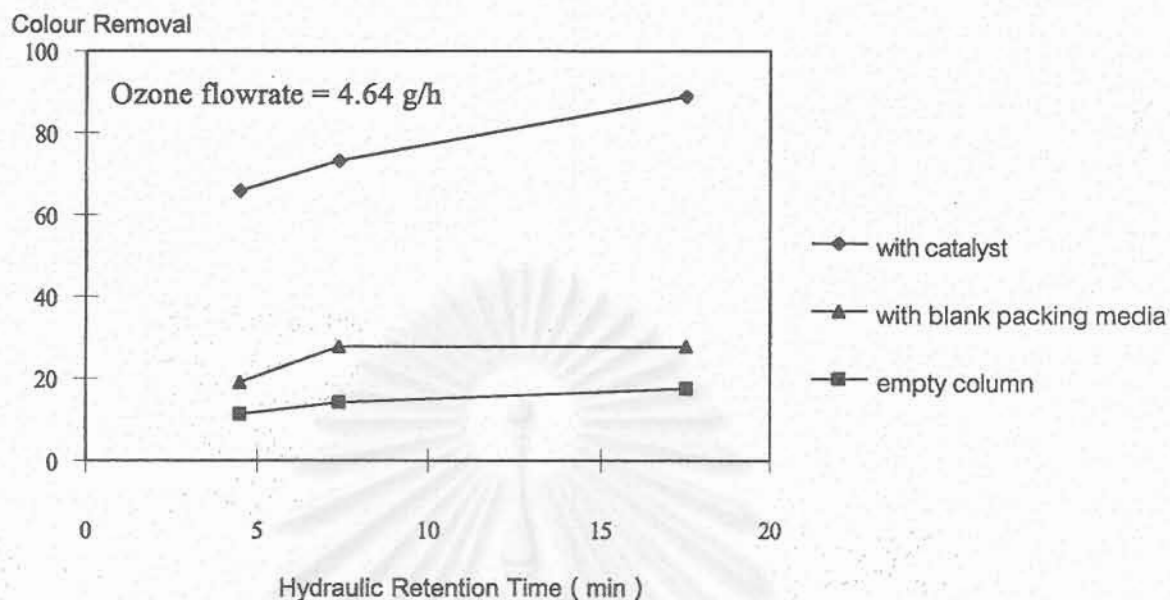
รูปที่ 4.10 แสดงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของระบบไอโซนมีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ระบบไอโซนมีบรรจุเม็ดออกซิเจนอย่างเดียว และระบบไอโซนมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เคลือบบนผิวเม็ดออกซิเจน ในกรณีแรกระบบไอโซนมีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีเม็ดออกซิเจน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเก็บกักเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีคอลัมน์ไอโซนมีบรรจุเม็ดออกซิเจน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีเม็ดออกซิเจนบรรจุ ทั้งนี้เนื่องจากการมีเม็ดออกซิเจนเท่ากับเป็นการเพิ่มพื้นที่ปฏิกิริยาระหว่างไอโซนมีและสารอินทรีย์ และการมีเม็ดออกซิเจนบรรจุในคอลัมน์ช่วยให้ฟองก๊าซไอโซนมีใช้เวลานานขึ้นกว่าจะหลุดออกจากคอลัมน์ ด้วยเหตุผลสองประการดังกล่าวจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นในกรณีมีเม็ดออกซิเจนบรรจุในคอลัมน์ และการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีนี้สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักสูงขึ้น ในกรณีสุดท้ายที่มีการใช้เหล็กออกไซด์เคลือบบนผิวเม็ดออกซิเจนซึ่งบรรจุในคอลัมน์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสองกรณีแรก โดยเฉพาะที่เวลาเก็บกักเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของระบบไอโซนมีเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นมาก โดยที่เวลาเก็บกัก 17.52 นาที ระบบไอโซนมีที่มีเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงถึง 63.3 % ในขณะที่ระบบไอโซนมีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีต่ำเพียง 28.5 %



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดค่า COD ของระบบโอโซนเมื่อมีวัสดุบรรจุ มีตัวเร่งปฏิกิริยา, มีวัสดุบรรจุไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่มีวัสดุบรรจุ

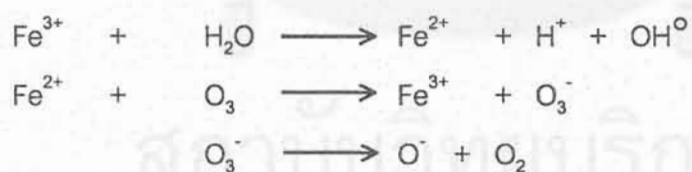
4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสี

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เวลาเก็บกักต่าง ๆ ของระบบโอโซนไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ระบบโอโซนที่มีเม็ดอลูมินาบรรจุในคอลัมน์ และระบบโอโซนที่มีเหล็กออกไซด์เคลือบบนผิวเม็ดอลูมินา เช่นเดียวกันประสิทธิภาพการกำจัดสีมีแนวโน้มเหมือนประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ได้อีกได้กล่าวมาแล้ว โดยระบบโอโซนมีเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาเก็บกัก 17.52 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดถึง 88.6 % จากการต่อเส้นกราฟ (Extrapolation) อาจประเมินได้ว่าถ้าต้องการกำจัดสี 100 % จะต้องเพิ่มเวลาเก็บกักยาวนานถึง 25 - 30 นาที



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบโอโซนแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา, มีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาเก็บกักต่าง ๆ

จากผลการทดลองดังกล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่าเหล็กออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์อย่างเห็นเด่นชัด เหล็กออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโอโซนกับสารอินทรีย์นี้ สามารถอธิบายได้ดังสมการดังต่อไปนี้



โดย Fe^{3+} ถูกเปลี่ยนเป็น Fe^{2+} และ hydroxyl free radical (OH°) ซึ่ง Free radical hydroxyl ที่เกิดขึ้นนี้จะถูกใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและสูงกว่าโอโซนโดยตรง ดังนั้นการประยุกต์ใช้ระบบโอโซนในการกำจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำเสีย ควรใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาควบคู่ในระบบไปด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ใช้น้ำกาบส่าที่เจือจาง 20 เท่า โดยระบบโอโซนอย่างเดียวไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราการใช้โอโซนสูงขึ้นและเวลาเก็บกักยาวนานขึ้น การเพิ่มอัตราโอโซนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีมากกว่าการเพิ่มเวลาเก็บกัก

เมื่อบรรจุคอลัมน์โอโซนด้วยเม็ดอะลูมินา พบว่าระบบโอโซนมีประสิทธิภาพทั้งการกำจัดซีไอดีและสีเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์โอโซนที่ไม่มีเม็ดอะลูมินา ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดอะลูมินาช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้สูงขึ้น และทำให้ก๊าซโอโซนมีเวลาเก็บกักยาวนานขึ้น จึงทำให้สารอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์ได้มากขึ้น

ในกรณีเมื่อมีการใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าระบบโอโซนมีประสิทธิภาพทั้งการกำจัดซีไอดีและสีสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กออกไซด์ทำให้เกิด Hydroxyl free radical ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์สูงกว่าโอโซนมาก โดยที่เวลาเก็บกัก 17.52 นาที ระบบโอโซนมีเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี 63.35 % และประสิทธิภาพการกำจัดสี 88.55 % ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ระบบโอโซนควรมีเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้บ่งชี้ถึงความสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อระบบโอโซนอย่างมาก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาต่อเนื่องเพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานต่อไป งานวิจัยที่ควรดำเนินการต่อควรพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

- ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นที่น่าจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นกว่าหรือเทียบเท่าเหล็กออกไซด์
- ควรศึกษาวิจัยระบบโอโซนกับน้ำเสียประเภทอื่น ๆ
- ศึกษาการใช้แสงอุลตราไวโอเล็ตควบคู่กับระบบโอโซนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารอ้างอิง

1. Adams, C.D., Fusco, W. and Kanzelmeyer, T.C. (1995), " Ozone, Hydrogen Peroxide/Ozone Treatment of Chromium and Copper - Complex Dyes : Decolorization and Metal Release ", Ozone Science and Engineering, vol.17, p. 149 - 162.
2. Beltran, F.J., Encinar, J.M. and Garcia - Araya, J.F. (1993), " Oxidation by Ozone and Chlorine Dioxide of Two Distillery Wastewater Contaminants : Gallic Acid and Epicatechin ", Water Research, vol. 27, no.6, p. 1023-1032.
3. Evans, Francis, L., (1972), " Ozone in Water and Wastewater Treatment ", Ann Arbor, Mich: Ann Arbor Science.
4. Galbraith, M., et al. (1992), " Hazardous and Industrial Wastes ", Proc. 24th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, Morgantown.
5. Glaze, W.H., et al., (1980), " Oxidation of Water Supply Refractory Species by Ozone with Ultraviolet Radiation ", US Environment Protection Agency: Washington D.C., p.80-110.
6. Gulyas, H., Bockelmann, D., Hermmerling, L., Bahnemann, D. and Sekoulov, I. (1994), " Treatment of Recalcitrant Organic Compounds in Oil Reclaiming wastewater by Ozone/Hydrogen Peroxide and UV/Titanium Dioxide " , Water Science Technology, vol.29, no.9, p.129 -132
7. Hoigne, J., and Bader, H., (1983), " Rate constant of the reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water ", Water Res., vol. 17, p.173 - 184.
8. Langlais, Bruno, Reckhow, David, A., Brink, and Deboerah, R., (1991), " Ozone in Water Treatment : Application and Engineering " , Chelsea : Lewis.,C.
9. Lin, S.H. and Yeh, K.L., (1993), " Looking To Treat Wastewater ? Try Ozone " , Chemical Engineering, p. 112-116.
10. Masten, Susan, J., Davis, and Simon, H.R. (1994), " The use of ozonation to degrade organic contaminants in wastewater " , Environ. Sci. Technol., vol 28, no.4, p.181A-185A.
11. Nebel, C., Gottschling, R.D., O'Neil, and H. J., (1974) " Ozone Decolorization of Pulp and Paper Secondary Effluents " , Welsbach Ozone Systems, Philadelphia.

12. Olson, T. M. and Barbier, P.F., (1994), " Oxidation Kinetics of Natural Organic Matter by Sonolysis and Ozone ", Water Research, vol.28, no.6, p.1383 - 1391.
13. Paillard, H., Dorel, M. and Bourbogot, M.M., " Prospect Concerning Applications of Catalytic Ozonation in Drinking Water Treatment ", Proc. 10th Ozone World Congress, Monaco, vol. 1 (Intl. Ozone Assoc., European - African Group, 1991) p.261-279.
14. Preis, S., Kamenev, S., Kallas, J. and Munter, R.(1995), " Advanced Oxidation Processes Against Phenolic Compounds in Wastewater ", Ozone Science and Engineering, vol.17, p. 399 - 418.
15. Ruppert, G. and Bauer, R. (1994), " UV-O₃, UV-H₂O₂, UV-TiO₂ and the Photo -Fenton Reaction Comparison of Advanced Processes for Wastewater Treatment ", Chemosphere, vol.28, no.8, p. 1447-1454.
16. Schulte, P., Bayer, A., Kuhn, F., Luy, T. and Volkmer, M. (1995), " H₂O₂/O₃, H₂O₂/UV and H₂O₂/Fe²⁺ Processes for the Oxidation of Hazardous Wastes ", Ozone Science and Engineering, vol. 17, p. 119-134.

ภาคผนวก
ข้อมูลการทดลอง

1. แบบไม่บรรจุวัสดุตัวกลางในคอลัมน์

1.1 เมื่อแปรเปลี่ยน power ของเครื่องกำเนิดโอโซน

อัตราการไหลของโอโซน	15 l/hr
อัตราการไหลของน้ำอากาศ	75 ml/min
ปริมาตรจุกคอลัมน์	600 ml
เวลา	10 min

power (unit)	COD (mg/l)		TOC (ppm)		ค่าการดูดกลืนแสง(A)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
100	12,264	7,360	3,577	3,418	1.698	1.140
150	12,264	3,680	3,577	3,224	1.698	1.000
200	12,264	2,731	3,577	3,209	1.698	0.912

1.2 เมื่อแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโอโซน (โดยปรับอัตราการไหลของโอโซน)

อัตราการไหลของน้ำอากาศ	75 ml/min
ปริมาตรจุกคอลัมน์	600 ml
เวลา	10 min
power	100 unit

โอโซน (g/h)	COD (mg/l)		TOC (ppm)		ค่าการดูดกลืนแสง(A)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
0.33	12,264	9,104	3,577	3,554	1.698	1.376
0.50	12,264	7,360	3,577	3,418	1.698	1.140
0.67	12,264	7,008	3,577	3,526	1.698	1.138
1.00	12,264	6,373	3,577	3,412	1.698	1.112

1.3 เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำกากส่า

อัตราการไหลของไอโซน	15 l/hr	(0.5 g/h)
ปริมาตรจุคอัลมันน์	600 ml	
เวลา	10 min	
power	100 unit	

น้ำกากส่า (ml/min)	COD (mg/l)		TOC (ppm)		ค่าการดูดกลืนแสง(A)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
30	12,264	5,520	3,577	3,385	1.698	1.078
50	12,264	5,256	3,577	3,573	1.698	1.120
75	12,264	7,360	3,577	3,418	1.698	1.140
100	12,264	11,040	3,577	3,443	1.698	1.490

1.4 เมื่อแปรเปลี่ยนการจับเวลาในการให้น้ำกากส่าเข้าคอัลมันน์

อัตราการไหลของไอโซน	15 l/hr	(0.5 g/h)
อัตราการไหลของน้ำกากส่า	75 ml/min	
ปริมาตรจุคอัลมันน์	600 ml	
power	100 unit	

เวลา (min)	COD (mg/l)		TOC (ppm)		ค่าการดูดกลืนแสง(A)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
10	12,264	7,360	3,577	3,418	1.698	1.140
20	12,264	7,373	3,577	3,498	1.698	1.218
30	12,264	7,462	3,577	3,424	1.698	1.224

1.5 เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาตรของน้ำกากส่าในคอลัมน์

อัตราการไหลของไอโซน	15 l/hr	(0.5 g/h)
อัตราการไหลของน้ำกากส่า	75 ml/min	
power	100 unit	
เวลา	10 min	

คอลัมน์ (ml)	COD (mg/l)		TOC (ppm)		ค่าการดูดกลืนแสง(A)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
300	12,264	8,760	3,577	3,388	1.698	1.474
600	12,264	7,360	3,577	3,418	1.698	1.140
900	12,264	7,283	3,577	3,451	1.698	1.216

2.1 แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.1 เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเมื่อความเข้มข้นไอโซน 2.96 g/h

อัตราการไหลของไอโซน	2.96	g/h
ปริมาตรจุกคอลัมน์	680	ml

น้ำกากส่า (ml/min)	เวลาเก็บกัก (min)	COD (mg/l)		ค่าการดูดกลืน (A)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
21.80	17.52	68500	56100	0.639	0.538
50.90	7.40	68500	60700	0.639	0.558
80.00	4.53	68500	61500	0.639	0.578

2.1.2 เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเมื่อความเข้มข้นไอโซน 3.90g/h

อัตราการไหลของไอโซน	3.90	g/h
ปริมาตรจุกคอลัมน์	680	ml

น้ำกากส่า (ml/min)	เวลาเก็บกัก (min)	COD (mg/l)		ค่าการดูดกลืน (A)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
21.80	17.52	68500	54500	0.639	0.527
50.90	7.40	68500	57900	0.639	0.553
80.00	4.53	68500	58100	0.639	0.572

2.1.3 เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเมื่อความเข้มข้นโอโซน 4.64 g/h

อัตราการไหลของโอโซน 4.64 g/h

ปริมาตรจุกอิลมันน์ 680 ml

น้ำกากส่า (ml/min)	เวลาเก็บกัก (min)	COD (mg/l)		ค่าการดูดกลืน (A)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
21.80	17.52	68500	49000	0.639	0.525
50.90	7.40	68500	50600	0.639	0.550
80.00	4.53	68500	50740	0.639	0.566

2.2 แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.1 เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเมื่อความเข้มข้นโอโซน 2.96 g/h

อัตราการไหลของโอโซน 2.96 g/h

ปริมาตรจุกอิลมันน์ 680 ml

น้ำกากส่า (ml/min)	เวลาเก็บกัก (min)	COD (mg/l)		ค่าการดูดกลืน (A)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
21.80	17.52	68500	54070	0.639	0.011
50.90	7.40	68500	56570	0.639	0.256
80.00	4.53	68500	60100	0.639	0.287

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเมื่อความเข้มข้นไอโซน 3.90 g/h

อัตราการไหลของไอโซน 3.90 g/h

ปริมาตรจุคอลลัมน์ 680 ml

น้ำกากส่า (ml/min)	เวลาเก็บกัก (min)	COD (mg/l)		ค่าการดูดกลืน (A)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
21.80	17.52	68500	45050	0.639	0.083
50.90	7.40	68500	53190	0.639	0.195
80.00	4.53	68500	57420	0.639	0.273

2.2.3 เมื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำกากส่าเมื่อความเข้มข้นไอโซน 4.64 g/h

อัตราการไหลของไอโซน 4.64 g/h

ปริมาตรจุคอลลัมน์ 680 ml

น้ำกากส่า (ml/min)	เวลาเก็บกัก (min)	COD (mg/l)		ค่าการดูดกลืน (A)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
21.80	17.52	68500	25110	0.639	0.073
50.90	7.40	68500	32110	0.639	0.17
80.00	4.53	68500	43100	0.639	0.218