ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม — **สาขา**

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม — **ภาควิชา**

เรื่อง การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโอโซเนชัน

Treatment of Acetaldehyde in Synthetic Wastewater by Ozonation Process

นามผู้วิจัย นางสาวพรนภัส วงศ์แสนสุขเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการโอโซเนชัน

Treatment of Acetaldehyde in Synthetic Wastewater by Ozonation Process

โดย

นางสาวพรนภัส วงศ์แสนสุขเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2558

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พรนภัส วงศ์แสนสุขเจริญ 2558: การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโอโซเนชัน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing. 121 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโอโซเนชันโดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test) และแบบต่อเนื่อง (Continuous test) ด้วยเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T ที่มีอัตราการผลิต 204.67 mg/hr. ที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/min คิดเป็นปริมาณโอโซนต่ออากาศ 0.97 mg/L และค่าความเข้มข้นของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำเฉลี่ย 0.304 mg/L

ผลการศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโอโซเนชันทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch test) ในน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ปริมาตร 1 ลิตร ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์เริ่มต้น 10, 25 และ50 mg/L โดยทดลองที่ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.3 mg/L ระยะเวลาสัมผัส 0 ถึง 2.92 ชั่วโมง พบว่าโอโซเนชันสามารถบำบัดอะซิตัลดีไฮด์และสารอินทรีย์ในน้ำเสียลงได้ โดยที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำ 0.3 mg/L และระยะเวลาสัมผัส 2.92 ชั่วโมง สามารถบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ได้สูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 79.64% และซีโอดีเท่ากับ 57.76% และอัตราส่วนBOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.1278 เป็น 0.4685 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโอโซเนชันมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมจากการบำบัดแบบแบตช์ที่ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 0.58, 0.97, 1.95 และ 2.92 ชั่วโมง มาทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous test) ประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 38%, 50.98%, 65.54% และ 74.44% ตามลำดับ ค่าซีโอดี 17.49%, 34.27%, 44.43% และ 57.14% ตามลำดับ ค่าBOD_5/COD เพิ่มขึ้น 35.84%, 53.99%, 60.29% และ 75% ตามลำดับ และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาสารผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่าอะซิตัลดีไฮด์บางส่วนเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดอินทรีย์คือ Formic acid ซึ่งพบในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Pondnapas Vongsansukcharoen 2015: Treatment of Acetaldehyde in Synthetic Wastewater by Ozonation Process. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Mongkol Damrongsri, Dr.Ing. 121 pages.

The objective of this research is to study treatment of acetaldehyde in synthetic wastewater by ozonation process. Optimum condition and removal percentage of acetaldehyde in ozonation process were investigated. Ozonation of synthetic wastewater were conducted in batch and continuous tests using an ozone generator with a production rate of 204.67 mg/hr, air flow 3.5 L/min, Ozone dose/air 0.97 mg/L and the saturated ozone concentration of 0.304 mg/L.

The results showed that treatment of acetaldehyde in synthetic wastewater by ozonation process was conducted in batch test. The chosen initial acetaldehyde concentration in the experiments were 10, 25 and 50 mg/L. The volume of synthetic wastewater used was 1 L, varying dissolved ozone concentration from 0 to 0.3 mg/L and contact time from 0 to 2.92 hr. The results showed that ozonation was able to remove acetaldehyde and organic compounds in synthetic wastewater. Acetaldehyde removal was highest at dissolved ozone concentration of 0.3 mg/L and a contact time of 2.92 hr. At initial acetaldehyde concentration of 10 mg/L, the removal efficiency for acetaldehyde and COD were 79.64% and 57.76%, respectively. According to BOD_5/COD ratio of wastewater, it was found that ozone treated wastewater employed higher BOD_5/COD ratio than the initial, from 0.1278 to 0.4685, indicating higher biodegradability of organic compounds. Then ozonation process was investigated in continuous test, varying contact time 0.58, 0.97, 1.95 and 2.92 hr. The results showed that the removal efficiency for acetaldehyde were 38%, 50.98%, 65.54% and 74.44%, respectively, and COD were 17.49%, 34.27%, 44.43% and 57.14%, respectively. A higher BOD_5/COD ratio than the initial 35.84%, 53.99%, 60.29% and 75%, respectively. And then the results showed that ozonation changed acetaldehyde into other forms of organic compounds. This was confirmed by HPLC analysis which found formic acid in treated wastewater.

_____ _____ __ / __ / __

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.มงคล ดำรงค์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในการวางแผนและสร้างแนวทางในการวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ประธานกรรมการดำเนินการสอบ และ รศ.ดร.เฉลิมราช วันทวิน ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำแนะนำในด้านวิชาการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด จ.ปทุมธานี ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ ที่ให้คำแนะนำ ให้ความรู้เพิ่มเติม และช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆในการทดลอง ขอขอบคุณ คุณกาญจนา ทุยเวียง เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกร าบขอบพระคุณ บิดามารด า และขอขอบคุณ เพื่อน พี่น้องทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

พรนภัส วงศ์แสนสุขเจริญ

พฤศจิกายน 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	85
สรุป	85
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ภาคผนวก	92
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	121

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง	4
2	สมบัติทางกายภาพของอะซิตัลดีไฮด์	5
3	อันตรายของอะซิตัลดีไฮด์ต่อสุขภาพอนามัย	6
4	คุณสมบัติทั่วไปของโอโซน	10
5	ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ	11
6	ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ	12
7	อำนาจในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของสารออกซิแดนท์ชนิดต่าง ๆ	15
8	ค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซนในบรรยากาศเทียบกับอุณหภูมิ	24
9	ค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซนที่ละลายในน้ำเทียบกับอุณหภูมิ	24
10	By products ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้โอโซนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค	26
11	การออกซิเดชันสารอนินทรีย์โดยกระบวนการโอโซเนชัน	28
12	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์	51
13	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างหลังผ่านโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง	52
14	อัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T	53
15	ค่าความเข้มข้นโอโซนที่ละลายในน้ำประปาที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ	55
16	ค่าระยะเวลาสัมผัสโอโซนเทียบกับปริมาตรน้ำประปาที่ค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำต่าง ๆ	59
17	ค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำและระยะเวลาสัมผัสในกระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในสภาวะแบบแบตช์ (batch) ที่ใช้ในการทดลอง	60
18	ผลของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์ ที่ปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5L/min	61
19	แสดงค่าอัตราส่วน BOD_5/COD ก่อนและหลังบำบัดด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ต่าง ๆ	65
20	สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous)	68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่Contact time 0.58 hr.	70
22	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 0.97 hr	73
23	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 1.95 hr	76
24	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 2.92 hr.	79
25	สัดส่วนอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดต่อปริมาณโอโซน	81
26	ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสมในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง	82
27	ผลของสารผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโอโซเนชัน	84

ตารางผนวกที่

1	แสดงค่าน้ำหนักของโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ชั่งมาและปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ไทเทรตได้	93
2	แสดงน้ำหนักของโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ชั่งมาและปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ไทเทรตได้ และความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่คำนวณได้	94
3	ผลการหาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน	95
4	ค่าอัตรการละลายน้ำของเครื่องกำเนิดโอโซน	99
5	กราฟมาตรฐานของ Acetaldehyde ที่ค่า Absorbance (Abs.) และสารมาตรฐาน Acetaldehyde (mg/L) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	101
6	ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์ (batch) ที่ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร	102

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
7	ค่าซีโอดีของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชัน แบบแบตช์ (batch) ที่ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร	105
8	ผลของค่าBOD_5/COD ratio ที่การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วยโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch Test)	106
9	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 0.58 hr.	107
10	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 0.97 hr.	108
11	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 1.95 hr.	109
12	ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องที่ (continuous) ที่ Contact time 2.92 hr.	110
13	สัดส่วนอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดต่อปริมาณโอโซน	111
14	ผลของกระบวนการโอโซเนชันที่สภาวะเหมาะสมในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง	112
15	HPLC Condition for Organic acid (Method Inertsil Column)	113
16	Shimadzu HPLC	113
17	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของFormic acid	114
18	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของ Acetic acid	115
19	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของกรดชนิดต่าง ๆ ก่อนบำบัดด้วยโอโซเนชัน แบบต่อเนื่อง	115
20	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของกรดชนิดต่าง ๆ หลังบำบัดด้วยโอโซเนชัน แบบต่อเนื่อง ที่ Contact time 2.92 hr.ครั้งที่ 1	116
21	พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของกรดชนิดต่าง ๆหลังบำบัดด้วยโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง ที่ Contact time 2.92 hr.ครั้งที่ 2	117
22	Maximum Dissolved Oxygen Concentration Saturation Table	120

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป	3
2	โครงสร้างอะซิตัลดีไฮด์	5
3	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนเทียบกับอุณหภูมิที่ความเข้มข้นของโอโซนต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (0 PSIG)	12
4	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนเทียบกับอุณหภูมิที่ปริมาณโอโซนต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (0 PSIG)	13
5	ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนเมื่อละลายน้ำ	14
6	การผลิตโอโซนด้วยวิธีอัลตราไวโอเลต	16
7	การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ	17
8	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซเนชันทั้งทางตรงและทางอ้อม	18
9	การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลของโอโซน	18
10	การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole - mediate attack	19
11	การสลายตัวของอัลดีไฮด์และคีโตนด้วยก๊าซโอโซน	19
12	การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Electrophilic attack	20
13	ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับฟีนอลแบบ Electrophilic attack	20
14	ระบบการบำบัดด้วยโอโซน	30
15	เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) ของ OZZON รุ่น OZ-6501T	37
16	แบบจำลองถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง	38
17	ขั้นตอนการศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซเนชัน	39
18	ขั้นตอนการวิเคราะห์หากราฟมาตรฐานของอะซิตัลดีไฮด์	41
19	กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) กับความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ที่ค่าต่าง ๆ	42
20	แผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)	43
21	ภาพแสดงเครื่องมือทดลองระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)	43
22	แผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test)	44
23	ภาพแสดงเครื่องมือทดลองระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test)	44
24	แสดงการหาอัตราผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน	47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แสดงขั้นตอนการหาอัตราการละลายของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปา	49
26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำและระยะเวลา เดินระบบ	50
27	ปริมาณโอโซน (mg) ที่ผลิตได้เทียบกับระยะเวลาเดินเครื่องโอโซน (min)	54
28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโอโซนละลายในน้ำเทียบกับระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ปริมาตรน้ำประปาต่าง ๆ กัน ที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/mim	56
29	กราฟมาตรฐานของโอโซนละลายน้ำที่ปริมาตรน้ำประปา 100 ml	57
30	กราฟมาตรฐานของโอโซนละลายน้ำที่ปริมาตรน้ำประปา 200 ml	57
31	กราฟมาตรฐานของโอโซนละลายน้ำที่ปริมาตรน้ำประปา 300 ml	58
32	แสดงแผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)	58
33	กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสโอโซนเทียบกับปริมาตรน้ำประปาที่ค่าโอโซนละลายน้ำ 0.06, 0.10, 0.20, 0.25 และ 0.30 mg/L	60
34	ประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์(batch) ที่ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำและระยะเวลาสัมผัสค่าต่าง ๆอัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	63
35	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำต่าง ๆอัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	64
36	อัตราส่วนBOD_5/COD ที่อะซิตัลดีไฮด์ก่อนและหลังบำบัดด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0 และ 0.3 mg/L	66
37	แผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test)	67
38	อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 2 ชั่วโมง ที่ Contact time 0.58 hr., อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	71
39	ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่ Contact time 0.58 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	71

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 3 ชั่วโมง ที่ Contact time 0.97 hr.อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	74
41	ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 3 ชั่วโมง ที่ Dissolved Ozone Conc. 0.1 mg/L, Contact time 0.97 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	74
42	อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 6 ชั่วโมง ที่ Contact time 1.95 hr.อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	77
43	ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 6 ชั่วโมง ที่ Dissolved Ozone Conc. 0.2 mg/L, Contact time 1.95 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	77
44	อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 8 ชั่วโมง ที่ Dissolved Ozone Conc. 0.3 mg/L, Contact time 2.92 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	80
45	ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 8 ชั่วโมง ที่ Dissolved Ozone Conc. 0.3 mg/L, Contact time 2.92 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min	80

ภาพผนวกที่

1	กราฟมาตรฐานของ Acetaldehyde (mg/L) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	101
2	กราฟมาตรฐานของ formic acid และ acetic acid ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2	114
3	โครมาโทแกรมของอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L ก่อนบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0.3 mg/L	115

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

4 โครมาโทแกรมของอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L หลังบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0.3 mg/L ครั้งที่ 1 116

5 โครมาโทแกรมของอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L หลังบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0.3 mg/L ครั้งที่ 2 117

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Abs.	=	ค่าการดูดกลืนแสง
BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
^{o}C	=	องศาเซลเซียส
cm	=	เซนติเมตร
COD	=	Chemical Oxygen Demand
EC_{50}	=	Half maxima effective concentration
g	=	กรัม
g/mol	=	กรัมต่อโมล
hr	=	ชั่วโมง
HPLC	=	High Performance Liquid Chromatography
LD_{50}	=	lethal dose 50
m	=	เมตร
m^3	=	ลูกบาศก์เมตร
mg/L	=	มิลลิกรัม/ลิตร
ml	=	มิลลิลิตร
nm	=	นาโนเมตร
pH	=	ความเป็นกรด-ด่าง
VAM	=	ไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (vinyl acetate monomer) มีสูตรเคมี คือ $C_4H_6O_2$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการโอโซเนชัน

Treatment of Acetaldehyde in Synthetic Wastewater by Ozonation Process

คำนำ

ปัจจุบันน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modified starch) ถือได้ว่าเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกของปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ทั้งประเภทที่เป็นอาหารให้จุลินทรีย์ได้ดี และที่มีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก ซึ่งเกิดจากสารพิษบางประเภท เช่น Vinyl acetate monomer (VAM), Acetaldehyde, Acetic acid และ Propylene glycol เป็นต้น โดยสารพิษไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (VAM) ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องกลิ่นรบกวน และเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ดังนั้นการปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ เช่น ทำให้แหล่งน้ำดูน่ารังเกียจ เกิดการเน่าเสีย ส่งผลต่อทัศนียภาพ และความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง เป็นต้น (Pena *et al.*, 2003)

ในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว มีหลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์, การใช้เทคโนโลยีเยื่อแผ่น และโอโซเนชัน เป็นต้น ซึ่งกระบวนการโอโซเนชันเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีกำลังออกซิเดชันสูง สามารถทำลายพันธะเคมีของสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดกลิ่น และลดความเป็นพิษของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก (ชัยวัฒน์, 2554) นอกจากนี้โอโซนยังไม่ทำให้เกิดปัญหาตกค้างในน้ำ

เนื่องจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป มีการเติมด่างคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำให้มีการแตกตัวของไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (VAM) เกิดเป็นอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสีย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซเนชัน และทำการศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียก่อนที่จะบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์

2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

ขอบเขตการวิจัย

1. น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ (น้ำประปา + อะซิตัลดีไฮด์ (99% pure Acetaldehyde)

2. ใช้เครื่องผลิตโอโซนของ OZZON รุ่น OZ-6501T ขนาด 1 g/hr.

3. สภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้แก่ อัตราการผลิตโอโซน อัตราการละลายน้ำของโอโซน และ ระยะเวลาสัมผัส โดยทำการศึกษาในระบบแบบแบตช์ (Batch test)

4. การวิเคราะห์หาปริมาณอะซิตัลดีไฮด์ ทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC, 1979)

5. เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้ว จะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการเดินระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test)

6. พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ศึกษาได้แก่ อัตราการผลิตโอโซน, ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำ (dissolved ozone concentration), ปริมาณอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัด (Acetaldehyde removal), ค่าCOD, อัตราส่วนBOD_5/COD และกรดอินทรีย์ (Organic acid) โดยใช้เทคนิค HPLC

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

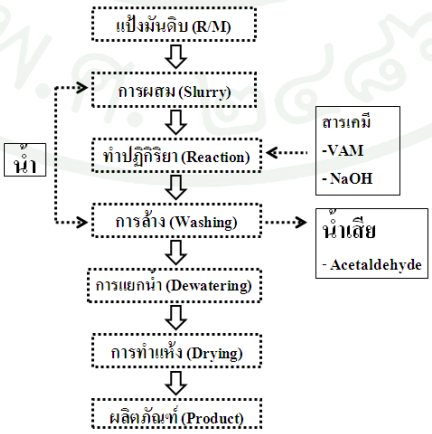
การตรวจเอกสาร

1. แป้งมันสำปะหลังแปรรูป

แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (modified starch) เป็นแป้งที่ได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native starch) มาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีหรือฟิสิกส์เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจาก ตัวแป้งมันสำปะหลัง (Native starch) มีคุณสมบัติบางประการที่ยังไม่ตรงกับความต้องการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าบางชนิด เช่ น ในการผลิตกระดาษ แป้งมันสำปะหลังจะเหนียวเกินกว่าที่เครื่องเคลือบจะทำงานได้หรือหากนำน้ำแป้งไปเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้น้ำที่ผสมอยู่แยกจากตัวแป้ง ทำให้ไม่เหมาะสมกับการทำน้ำสลัด ดังนั้น จึงได้มีความพยายามในการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในรูปแป้งแปรรูป (Modified starch) โดยการนำแป้งมาผ่านกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปตามที่ต้องการ เช่น ความหนืด (viscosity) ลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน กรรมวิธีการผลิตโดยวิธีทางเคมี กายภาพ เอนไซม์ หรือโดยจุลินทรีย์

1.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูปมีขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

โดยทั่วไปแป้งมันสำปะหลัง 1 ตัน ก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 10 – 20 ลูกบาศก์เมตร และมีภาระความสกปรกของสารอินทรีย์สูง โดยค่าบีโอดี ประมาณ 2,575-19,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี ประมาณ 6,046-52,399 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 999-15,710 มิลลิกรัมต่อลิตร ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

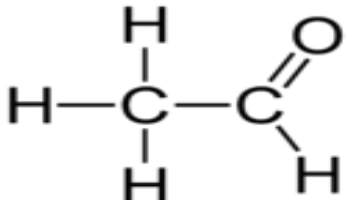
พารามิเตอร์	น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำประหลัง
พีเอช (pH)	5.1-7.4
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	999-15,710
บีโอดี (mg/l)	2,575-19,500
ซีโอดี (mg/L)	6,046-52,399
ทีเคเอ็น (mg/L)	-
สี (Pt Co)	-
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	-

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2554)

2. อะซิตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde)

อะซิตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) มีสูตรโมเลกุล คือ C_2H_4O มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 44.05 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ละลายในน้ำ มีกลิ่นฉุน ระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิห้อง ไวต่อปฏิกิริยาสูง มีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ ก่อให้เกิดเปอร์ออกไซด์ อาจเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง เป็นอันตรายเมื่อทำปฏิกิริยากับพลาสติก ยาง สารเคมีในสภาพที่เป็นไอระเหยหรือแก๊ส การผลิต ได้มาจากปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ของเอทานอล ใช้เป็นสารกึ่งกลาง (intermediate) ของการผลิตสารเคมีอื่นหลายชนิด เช่น acetic acid, acetic anhydride, cellulose acetate, vinyl acetate resins, acetate esters และpentaerythrito เป็นต้น สูตรโครงสร้างของอะซิตัลดีไฮด์ แสดงดังภาพที่ 2 และสมบัติทางกายภาพของอะซิตัลดีไฮด์ แสดงดังตารางที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างอะซิตัลดีไฮด์

ที่มา: วิกิพีเดีย (2556)

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของอะซิตัลดีไฮด์

สมบัติทางกายภาพ	ค่า
จุดเดือด (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ)	20.7 °C
จุดหลอมเหลว (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ)	-123 °C
อุณหภูมิวิกฤต	185 °C
จุดวาบไฟ	-38.8 °C
กลิ่น	มีกลิ่นฉุน
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 20°C (น้ำเท่ากับ 1)	0.783
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 20°C (อากาศเท่ากับ 1)	1.52
ความหนืด (ที่ 20°C)	0.215
ความสามารถในการละลายน้ำ (กรัม/100 มล.)	ละลายได้ดี

ที่มา: ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ (2556)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1 อันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (Health Effect)

อะซิตัลดีไฮด์ เป็นสารที่อันตรายต่อมนุษย์ ทั้งทางด้านสุขภาพอนามัย ทั้งทางระบบหายใจ ผิวหนัง ปาก ตา และทำให้เกิดความผิดปกติอื่น ๆ ค่าประมาณความเป็นพิษเฉียบพลัน เทียบโดยสัตว์ทดลอง และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ เทียบโดยสัตว์และพืชน้ำ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อันตรายของอะซิตัลดีไฮด์ต่อสุขภาพอนามัย

สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเอาไอระเหยหรือละอองเข้าไปจำนวนมาก ระหว่างการขนถ่ายอาจเป็นอันตรายได้
สัมผัสทางผิวหนัง	จะก่อให้เกิดการระคายเคือง ผื่นแดง และผิวหนังไหม้
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนกินเข้าไปในปริมาณมากระหว่างการขนถ่าย อาจเกิดอันตรายได้
สัมผัสถูกตา	จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาอย่างรุนแรง
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	เมื่อสัมผัสถูกสารนี้จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง การระคายเคืองต่อจมูก คอ ทางเดินหายใจ ระบบประสาทส่วนกลางถูกกด ทำให้เวียนศีรษะ เซื่องซึม ความอ่อนแอ เมื่อยล้า คลื่นไส้ ปวดศีรษะ ไม่ได้สติ ปอดบวม
ค่าประมาณความเป็นพิษเฉียบพลัน	ทางปากของหนู : LD_{50} (Oral, Rat) : 661 mg/kg
	ทางผิวหนังของกระต่าย : LD_{50} (Dermal, Rabbit): 3540 mg/kg
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์	ต่อปลา LC_{50} : 30.8 mg/l/96 hrs
	ต่อ Crustacea :Daphnia magna EC_{50} : 48.25 mg/l/48 hrs

ที่มา: ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ (2556)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป

3.1 วิธีการบำบัดทางเคมี

3.1.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี

การตกตะกอนด้วยสารเคมีถือเป็น การบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองหรืออาจใช้วิธีทางกายภาพตามหลังกระบวนการบำบัดแบบชีวภาพก็ได้ กระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) ถือเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักจะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดด่า ง ซึ่งสามารถกำจัด ค่าซีโอดี และสารประกอบอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกของกระบวนการดังกล่าวเกิดจากอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนจะถูกดูดติดกับผิว จุลินทรีย์ที่รวมตัวกันเป็นก้อน (Floc) โดยขัดขวางการเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ การใช้สารตกตะกอนมีห ลากหลายได้แก่ สารส้ม เฟอริกคลอไรด์ ปูนขาว พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น (มั่นสิน, 2542)

3.1.2 การออกซิเดชันทางเคมี

น้ำเสียจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แปรรูปมีค่าซีโอดีและบีโอดีที่สูง การใช้กระบวนการทางชีวภาพในบางครั้งไม่สามารถลดค่าซีโอดีที่สูงนี้ได้ เนื่องจ ากน้ำเสียมีสารประกอบอินทรีย์อยู่ เช่น Acetaldehyde, Vinyl acetate monomer (VAM), Acetic acid และ Propylene glycol เป็นต้น ซึ่งสารประกอบ เหล่านี้สามารถกำ จัดได้โดยการออกซิเดชันทางเคมี เนื่องจากสามารถทำลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพยากได้แล้ว ยังฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียได้อีกด้วย และจากการศึกษาวิจัยยังพบว่าสามารถทำลายสารประกอบฟีนอลิกได้เป็นอย่างดี (Pena *et al.*, 2003)

3.2 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียโดย วิธีชีวภาพหรือโดยใช้จุลินทรีย์ เป็นวิธีที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ เพาะเลี้ยงไว้ในถังเลี้ยงเชื้อ ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง จุลินทรีย์อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้ (มั่นสิน, 2542)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.1. แบบใช้ออกซิเจน

สารอินทรีย์ จะถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซ ด์และมีการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ขึ้นจำนวนมาก (ประมาณร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์) ข้อได้เปรียบของกระบวนการบำบัดแบบนี้คือ ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น แต่มีข้ อเสียคือต้องเสียค่าใช้จ่ายในการ ติดตั้งระบบ สูง เนื่องจากต้องมีการพ่นอากาศให้กับระบบ และยังต้องกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกิน นอกจากนี้ กระบวนการบำบัดแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กับน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงมาก ๆ เนื่องจากมีข้อจำกัดในการให้ออกซิเจนอย่างเพียงพอกับระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน เช่น ระบบสระเติมอากาศ ระบบตะกอนเร่ง เป็นต้น

- ระบบสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon system)

สระเติมอากาศมักจะเป็นบ่อดิน หรือบ่อคอนกรีตโดยพัฒนาจากบ่อย่ อยสลายธรรมชาติที่ส่งกลิ่นเหม็นจึงมีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศ เพื่อช่วยรับภาระน้ำเสียที่เข้ามาให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้ลดปัญหาก ลิ่นเหม็นที่เกิดจากบ่อดังกล่าว ระบบนี้เป็นระบบที่เติบโตแ บบแขวนลอย ดังนั้นเครื่องเติมอากาศจึงมีหน้าที่ทั้งให้ออกซิเจนแก่จุลินทรีย์ในระบบพร้อม ๆ กันนั้นช่วยให้จุลินทรีย์ได้แขวนลอยอยู่ในน้ำในสระเติมออกซิเจน

- ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge System)

ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นระบบบำบัดน้ำเสี ยด้วยวิธีชีวภาพโดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีปริมาณมากพอสำหรับการย่อยสลายสารอิ นทรีย์ในน้ำเสีย จุลินทรีย์เหล่านี้จะลอยอยู่ในน้ำตะกอนของถังเติมอากาศ ซึ่งจุลินทรีย์จะขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณขึ้นในลักษณะที่เรียกว่าการเจริญเติบโตแขวนลอย โดยทั่ว ไปภายในถังเติมอากาศจะมีระบบกว นซึ่งมักจะใช้เครื่องจักรก ลทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์หรือสลัดจ์แขวนลอยอยู่ภายในถังเติมอากาศตลอดเวลา เพื่อที่สามารถควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ภายในระบบตะกอนเร่งได้ ตามที่ต้องการ ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบแยกน้ำใสออกจากน้ำสลัดจ์ซึ่งนิยมใช้ถังตกตะกอนทำหน้าที่แยกน้ำทิ้งออกจากน้ำสลัดจ์ เพื่อปล่อยน้ำทิ้งที่ใสไหลล้นออกจากถังตกตะกอน ส่วนบริเวณก้นถังตกตะกอนจะมี ความเข้มข้นของน้ำสลัดจ์มาก ซึ่งมักจะนำกลับไปสู่ถังเติมอากาศเพื่อช่วยในการควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศได้ ถ้าพบว่าระบบมีน้ำสลัดจ์มากเกินความต้องการก็อาจสูบถ่ายจากก้นถังตกตะกอนหรือจากถังเติมอากาศได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.2 แบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการนี้สารอินทรีย์ในน้ำเสียประมาณร้อยละ 80-90 ถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งรวมเรียกว่า ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ระบบดังกล่าวนี้ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายจะมีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้าทำให้ การเดินระบบเริ่มต้นได้ช้า อีกทั้งประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดต่ำจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการกักเก็บของเหลว (Hydraulic Retention Time; HRT) นานขึ้น ระบบบำบัดจึงมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ระบบยังมีการปรับ ตัวไม่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม และในระหว่างกำจัดบางครั้งอาจมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดขึ้นด้วย ทำให้มีกลิ่นเหม็น ระบบนี้จึงมีข้อจำกัดการใช้งาน (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม , 2551)

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีการนำก๊าซชีวภาพกลับไปใช้เป็นพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีการนำกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกันมากขึ้น ทั้งนี้เพราะนอกจากช่วยในการบำบัดแล้ว ยังให้ผลิตภัณฑ์ที่ นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ด้วย ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน เช่น ถังยูเอเอสบี และบ่อหมัก และระบบจานหมุนชีวภาพ เป็นต้น

- ถังยูเอเอสบี

เป็นถังหมั กประเภทย่อยสลายเร็วถึงเร็วมาก หลักการทำงานของถังหมักอาศัยการป้อนน้ำเสียเข้าทางด้าน ล่างของถังหมัก และปล่อยให้น้ำเสียไหลผ่านชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ด้านล่างของถังหมักจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ทั้งสารอินทรีย์ที่เป็นสารละลาย และสารแขวนลอย ทำให้เปลี่ยน ภาพไปเป็นก๊าซชีวภาพ มีผลทำให้ค่าซีโอดี บีโอดีสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง น้ำก็จะสะอาดขึ้น ยิ่งสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกย่อยสลายเปลี่ยนภาพกลายเป็นก๊าซชีวภาพมากเท่าไรก็ยิ่งจะทำให้น้ำที่ผ่านการหมักย่อยแล้ว สะอาดมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่น้ำเสียมีค่าซีโอดีและบีโอดีสูง ๆ จะนิยมบำบัดน้ำเสียโดยใช้การบำบัดแบบถังยูเอเอสบีนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. โอโซน (Ozone)

4.1 สมบัติของโอโซน

โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุล คือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 กรัมต่อโมล จัดเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ มีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่น คาวปลา โอโซนเป็นแก๊สที่ไม่มีสีแต่ที่ความเข้มข้นสูงจะมีสีน้ำเงิน โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงมีศักย์ออกซิเดชันเท่ากับ 2.07 โวลท์ ซึ่งสูงกว่าคลอรีน 1.52 เท่า โดยโอโซนมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ สารละลาย และในอากาศ มีความสามารถในการรับอิเลคต รอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยโอโซนทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) (สุรพล, 2543) คุณสมบัติทั่วไปของโอโซนแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทั่วไปของโอโซน

Properties	**Unit**	**Value**
Molecular weight	g	48.0
Boiling point	°C	-111.9 $\pm$ 0.3
Melting point	°C	-192.5 $\pm$ 0.4
Latent heat of vaporization at 111.9°C	kJ/kg	14.90
Liquid density at -183°C	kg/m^3	1574
Vapor density at 0°C and 1 atm	g/ml	2.154
Solubility in water at 20.0°C	mg/L	12.07
Vapor pressure at -183°C	kPa	11.0
Vapor density compared to dry air at 0°C and 1 atm	unit less	1.666
Specific volume of vapor at 0°C and 1 atm	m^3/kg	0.464
Critical temperature	°C	-12.1
Critical pressure	kPa	5532.3

ที่มา: Metcalf and Eddy (2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน

ความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซขึ้น อยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้คือ อุณหภูมิของน้ำ และความดันบรรยากาศ ปริมาณการละลายน้ำของก๊าซ ต่าง ๆ จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณการละลายน้ำของก๊าซสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Henry's Law โอโซนละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำ สูงเพิ่มขึ้นค่าความสามารถในการละลายของโอโซนจะลดลง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโอโซนในสถานะแก๊สอีกด้วย ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5 และภาพที่ 3

โอโซนที่ผลิตจากอากาศแห้ง 1 ลบ.เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม หรือเท่ากับ 2.4% โดยน้ำหนัก หรือ 1.4% โดยปริมาตร ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้โอโซนเพิ่มเป็น 60-90 กรัม หรือความเข้มข้นสูงถึง 3-4% โดยปริมาตร (มั่นสิน, 2542)

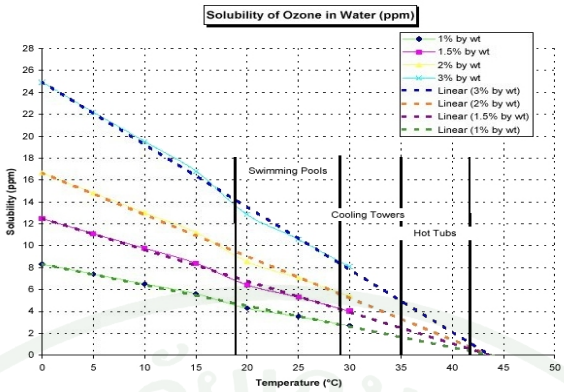
เมื่อเทียบกับปริมาณโอโซนในสถานะแก๊ส ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (0 PSIG) แสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 4

ตารางที่ 5 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Ozone concentration	**Ozone Solubility (mg/L)**					
% w/w	**Water Temperature**					
	5°C	**10°C**	**15°C**	**20°C**	**25°C**	**30°C**
0.1	0.74	0.65	0.55	0.42	0.35	0.27
1	7.34	6.5	5.6	4.29	3.53	2.70
1.5	11.09	9.75	8.4	6.43	5.29	4.04
2	14.79	13.0	11.19	8.57	7.05	5.39
3	22.18	19.5	16.79	12.86	10.58	8.09

ที่มา: Ozone solution (2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของโอโซนเทียบกับอุณหภูมิที่ความเข้มข้นของโอโซนต่าง ๆ

ที่มา: Ozone Solution (2010)

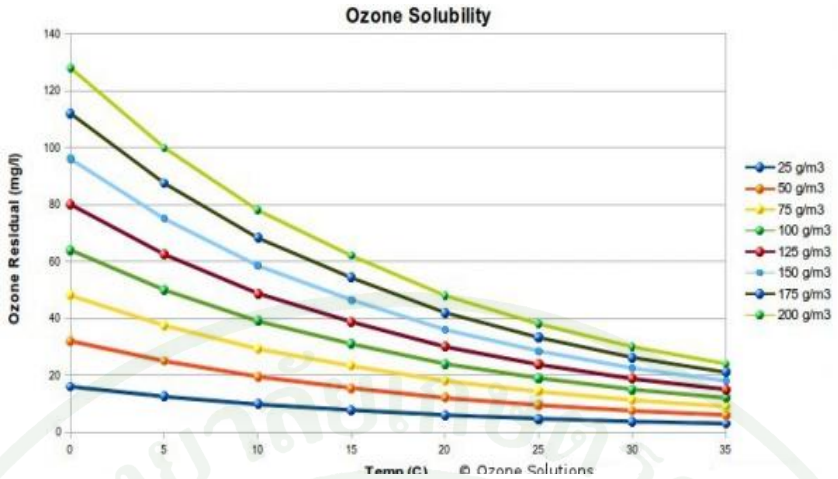
ตารางที่ 6 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Ozone Gas (g/m^3)	**Ozone Residual (mg/l)**							
	Water Temperature							
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
25 g/m^3	16	12.5	9.75	7.75	6	4.75	3.75	3
50 g/m^3	32	25	19.5	15.5	12	9.5	7.5	6
75 g/m^3	48	37.5	29.25	23.25	18	14.25	11.25	9
100 g/m^3	64	50	39	31	24	19	15	12
125 g/m^3	80	62.5	48.75	38.75	30	23.75	18.75	15
150 g/m^3	96	75	58.5	46.5	36	28.5	22.5	18.75
175 g/m^3	112	87.5	68.25	45.25	42	33.25	26.25	21
200 g/m^3	128	100	78	62	48	38	30	24

หมายเหตุ Ozone concentration in oxygen by weight, Ozone Gas 14.3 g/m3 = ozone 1%w, example 50 g/m3 = ozone 3.5%w

ที่มา: Ozone Solution (2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของโอโซนเทียบกับอุณหภูมิที่ปริมาณโอโซนต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (0 PSIG)

ที่มา: Ozone Solution (2012)

4.3 ปฏิกิริยาการละลายน้ำของโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว เมื่อโอโซนละลายน้ำจะแตกตัวให้ radicals ต่าง ๆ ได้แก่ Hydroxyl radicals (OH°), $HO°_2$, $HO°_3$, $HO°_4$ และ Super oxide (O_2^-) ซึ่ง radical ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ (strong oxidant) เมื่อโอโซนละลายน้ำจะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาการแตกตัวแสดงดังสมการที่ 1-7 ตามลำดับ

$$O_3 + OH^- \longrightarrow HO^{\bullet}_2 + O^{\bullet -}_2 \quad (1)$$

$$HO^{\bullet}_2 \longrightarrow O^{\bullet -}_2 + H^+ \quad (2)$$

$$O_3 + O^{\bullet -}_2 \longrightarrow O^{\bullet -}_3 + O_2 \quad (3)$$

$$O^{\bullet -}_3 + H^+ \longrightarrow HO^{\bullet}_3 \quad (4)$$

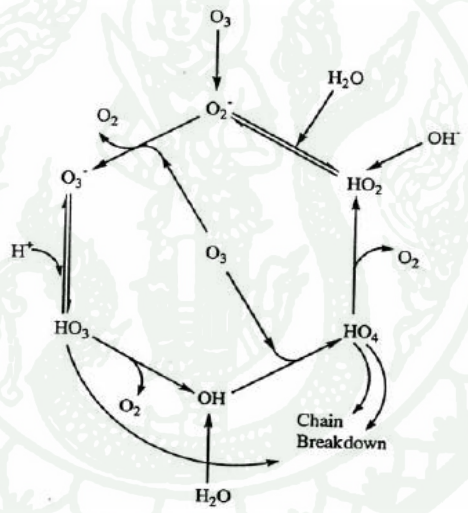
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$HO^{\bullet}_3 \longrightarrow OH^{\bullet} + O_2 \quad (5)$$

$$O_3 + OH^{\bullet} \longrightarrow HO^{\bullet}_4 \quad (6)$$

$$HO^{\bullet}_4 \longrightarrow HO^{\bullet}_2 + O^{\bullet-}_2 \quad (7)$$

การสลายตัวของโอโซนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นด่าง (Alkalinity) เพิ่มขึ้นทำให้โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และhydroxide ion (OH^-) ได้ hydroxyl radicals ในปริมาณมากขึ้น (Langlais *et al*., 1991) ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนเมื่อละลายน้ำกลายเป็น radicals ชนิดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนเมื่อละลายน้ำ

ที่มา: Langlais *et al.* (1991)

เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ชิงเอเจนต์ที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้สูง ทำให้สารอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากโอโซนแล้วยังมีสารออกซิแดนท์ชนิดอื่นที่มีการนำมาใช้เพื่อออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีอำนาจในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์แตกต่างกัน ตารางที่ 7 แสดงอำนาจในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของสารออกซิแดนท์ชนิดต่าง ๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 อำนาจในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของสารออกซิแดนท์ชนิดต่าง ๆ

Oxidizing species	Relative oxidation power
Fluorine	2.25
Hydroxyl radical*	2.05
Atomic oxygen	1.78
Ozone	1.52
Hydrogen peroxide	1.30
Perhydroxyl radical	1.25
Permanganate	1.23
Chlorine oxide	1.10
Hypochlorous acid	1.10
Chlorine	1.00
Bromine	0.80
Hydrogen oxide	0.64
Iodine	0.40
Oxygen	0.29

หมายเหตุ *formed when ozone decomposes

ที่มา: Lin and Yeh (1993)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.4 การเกิดโอโซน

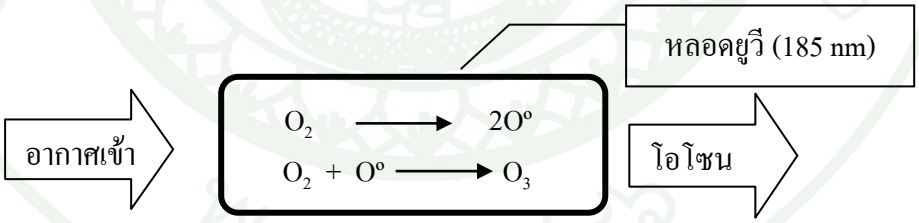
การเกิดโอโซนเกิดตามธรรมชาติได้ 2 แบบ (ธนิตและคณะ, 2553) คือ

1. ปรากฏการณ์จากแสงอัลตราไวโอเลต ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 2400 อังสตรอม ทำให้ออกซิเจน (O_2) ที่ได้รับรังสีในช่วงดังกล่าวแตกตัวออกเป็นอะตอมของออกซิเจน (O^o) และไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ ๆ เกิดเป็นแก๊สโอโซน

2. โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) เกิดในเวลาที่มีฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า ขณะฝนตก ปรากฏการณ์ดังกล่าวมี แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงมาก ทำให้ก๊ าซออกซิเจนแตกตัว เป็นอะตอมออกซิเจนและไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ เกิดเป็นแก๊สโอโซน

กระบวนการผลิตโอโซนในอุตสาหกรรมมี 3 แบบ คือ

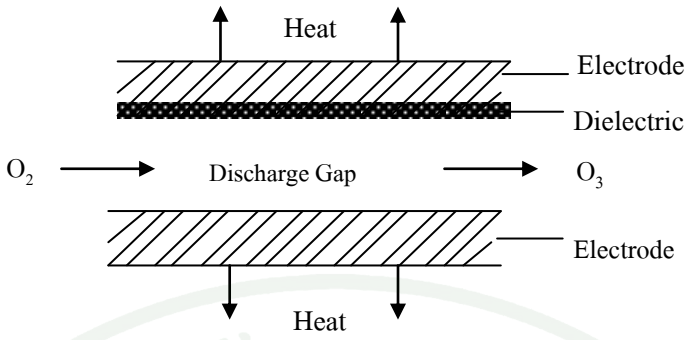
1. วิธีอัลตราไวโอเลต (UV method) เป็นการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ลงบนก๊าซออกซิเจน โดยใช้หลอดยูวี ขนาด 40 วัตต์ ซึ่งสามารถผลิตโอโซนได้ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การผลิตโอโซนด้วยวิธีอัลตราไวโอเลต

2. วิธีโคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) วิธีนี้ทำได้โดยการผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจน บริสุทธิ์ เข้าไปในช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000 – 22,000 โวลท์ ซึ่งโมเลกุลของ ก๊าซออกซิเจน บางส่วนจะแ ตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน โดยการวิ่งชนของอิเลคตรอน จากนั้นอะตอมของออกซิเจน จะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน กลายเป็นโอโซน แสดงดังภาพที่ 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ

3. วิธีโคลด์พลาสมา (Cold plasma method) เป็นการฉายแสงพลาสมาลงบนออกซิเจน โดยใช้แท่งแก้ว 2 แท่งที่บรรจุก๊าซเฉื่อยแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงลงบนแท่งแก้ว ทั้งสองเพื่อทำให้เกิดสนามพลาสมา วิธีนี้สามารถผลิตโอโซนได้ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

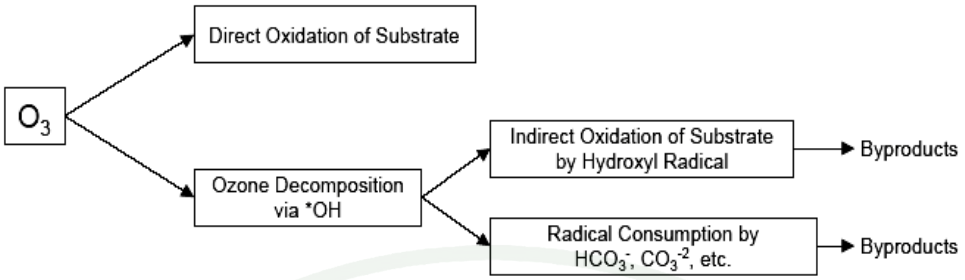
วิธีการผลิตโอโซนในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องผลิตโอโซนที่อาศัยหลักการของวิธีโคโรนา - ดิสชาร์จ โดยใช้อากาศแห้ง (ภายนอก) เป็นวัตถุดิบในการผลิตโอโซน

4.5 ปฏิกิริยาของโอโซเนชัน

โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic organic) ส่วนมากได้ดี และผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาส่วนมากจะมีพิษน้อยลง และถูกย่อยสลา ยทางชีวภาพได้ ค่าพลังงานอิสระ (Free energy) ของโอโซนมีค่าถึง - 400 kJ/mol ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาออก ซิไดซ์โดยโอโซนจะดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ ข้อเสียคือโอโซนสลายตัวให้ออกซิเจน (O_2) ได้เร็วมากในบรรยากาศ จึงต้องผลิตที่แหล่งบำบัด (On-site) โดยตรง

ปฏิกิริยาของโอโซนที่กระทำต่อสารอินทรีย์มี 2 แบบ คือ โมเลกุลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์โดย ทางตรง (Direct) และโดยทางอ้อม (Indirect) ซึ่งโอโซนแตกตัว เป็นแรดิคอลที่ว่องไวต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ดังแสดงในภาพที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

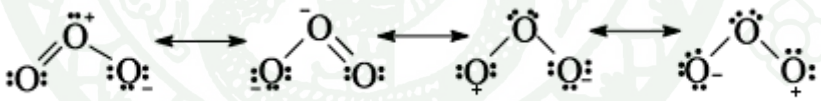


ภาพที่ 8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซเนชันทั้งทางตรงและทางอ้อม

ที่มา: Hoigne and Bader (1977)

4.5.1 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง (Direct Oxidation)

โมเลกุลของโอโซน (O_3) ไม่เป็นเส้นตรง มีพันธะระหว่างออกซิเจน 2 พันธะทำมุมระหว่างพันธะ116° 45′ ความยาวพันธะทั้งสองเท่ากันคือ 1.278 °A π อิเลคตรอนเกิดเรโซแนนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 9



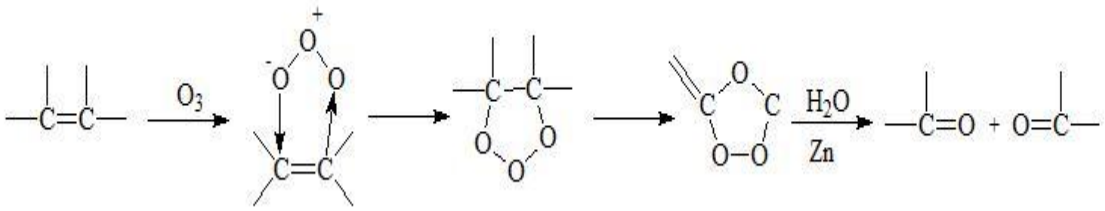
ภาพที่ 9 การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลของโอโซน

ที่มา: ปนัดดาและคณะ (2554)

π อิเลกตรอนจะถูกใช้ร่วมกันระหว่างออกซิเจนทั้ง 3 อะตอมจากโครงสร้างนี้จะเห็นได้ว่าโอโซนมีอิเลกตรอนมากเกินพอ และเป็นโมเลกุลมีขั้วจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงแบบ Dipole-mediat attack หรือแบบElectrophilic attack

1. Dipole - mediate attack โอโซนจะหันด้านขั้วลบของโมเลกุลเข้าหาพันธะคู่ของสารอินทรีย์ เกิด intermediate เป็นโมโนโอโซไนด์และโอโซไนด์ ดังแสดงในภาพที่ 10

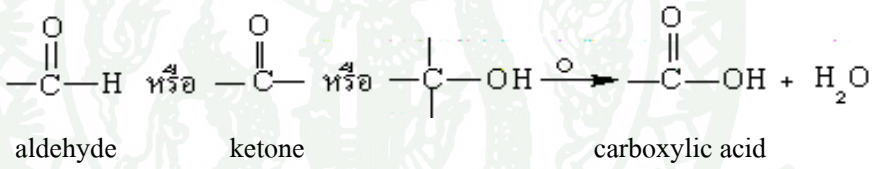
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole - mediate attack

ที่มา: ปนัดดาและคณะ (2554)

จากนั้นสลายตัวให้อัลดีไฮด์และคีโตน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนอัลดีไฮด์หรือคีโตนที่เกิดขึ้น รวมทั้งสารพวกแอลกอฮอล์จะถูกโอโซนออกซิไดซ์ต่อได้ กรดคาร์บอกซิลิกและน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 11

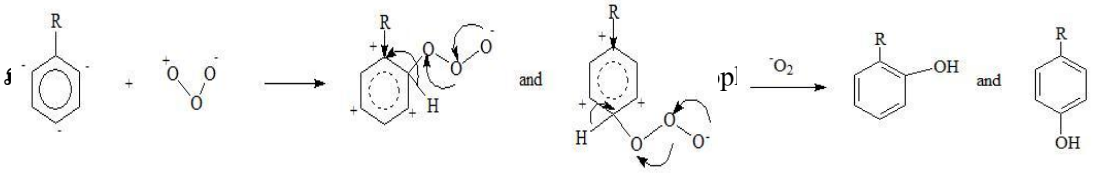


ภาพที่ 11 การสลายตัวของอัลดีไฮด์และคีโตนด้วยก๊าซโอโซน

ที่มา: ปนัดดาและคณะ (2554)

2. Electrophilic attack โอโซนสามารถทำหน้าที่เป็นอิเลคโตรไฟล์ (Electrophile) โดยหันด้านบวกของโมเลกุลเข้าหาบริเวณที่มีอิเลคตรอนหนาแน่นข องโมเลกุลสารอินทรีย์พวก ที่มีอะโรมาติกซึ่งความว่องไวของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับหมู่แทนที่ในวงเบนซีน (Benzene ring) ว่าเป็นหมู่ที่ให้อิเลคตรอน - OCH_3 , $-CH_3$ และ $-NO_2$ ปฏิกิริยาจะว่องไวขึ้น ถ้าวงเบนซีนมีหมู่แทนที่เป็นหมู่ดึงอิเลคตรอน (electron withdrawing group) เช่น $-COCH_3$, $-COOC_2H_5$, -Cl และ $-SO_3H$ ทำให้ความว่องไวของปฏิกิริยาแทนที่ Electrophile ในวงเบนซีนลดลง ดังแสดงในภาพที่ 12

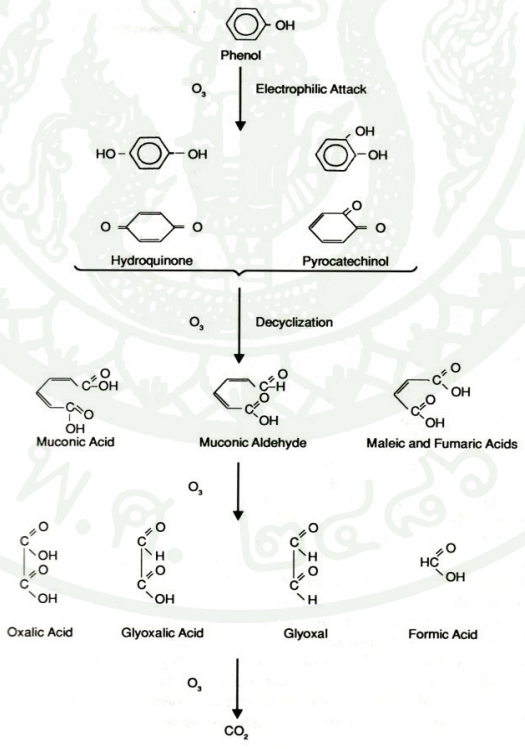
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Electrophilic attack

ที่มา: ปนัดดาและคณะ (2554)

การทำปฏิกิริยาโดยตรงจะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์ที่มีตำแหน่งเฉพาะเจาะจงหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่ ก๊าซ โอโซนสามารถออกซิไดซ์ได้ ถ้าเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว และ Halogenated aliphatic compound โมเลกุลของโอโซนไม่สามารถออกซิไดซ์สารพวกนี้ได้ ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับฟีนอลแบบ Electrophilic attack แสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับฟีนอลแบบ Electrophilic attack

ที่มา: Langlais *et al.* (1991)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.5.2 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเกิดผ่านแรดิคอล (Radical Mediate Oxidation)

การเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมเกี่ยวข้องกับแรดิคอล มีความซับซ้อน โดยขั้นแรกจะเกิดการสลายตัวของก๊าซโอโซน โดยถูกเร่งด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนเพื่อ ทำให้เกิดเป็นตัวออกซิแดนท์ เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคอล ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทันทีกับสารอินทรีย์ กลไกการเกิดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation step)

ปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนร่วมกับก๊าซโอโซนทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอล (Superoxide Anion, $O^{\circ-}_2$) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคอล (Hydroperoxide Radical, HO°_2) ดังสมการที่ 8 ไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคอลอยู่ในสมดุลกรด-เบส ดังสมการที่ 9

$$O_3 + OH^- \longrightarrow O_2^{\circ-} + OH_2^{\circ} \quad (8)$$

$$HO_2^{\circ} \longleftrightarrow O_2^{\circ-} + H^+ \quad (9)$$

2. ขั้นตอนลูกโซ่แรดิคอล (Radical chain step)

ปฏิกิริยาระหว่าง ก๊าซโอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอล ทำให้เกิดโอโซไนด์แอนไอออนแรดิคอล (Ozonide Anion Radical, $O_3^{\circ-}$) ซึ่งจะสลายตัวทันทีเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอล ดังสมการที่ 10, 11 และ 12 ไฮดรอกซิลแรดิคอล ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโอโซน ดังสมการที่ 13 และ 14

$$O_3 + O_2^{\circ-} \longrightarrow O_3^{\circ-} + O_2 \quad (10)$$

$$HO_3^{\circ} \longleftrightarrow O_3^{\circ-} + H^+ \quad (11)$$

$$HO_3^{\circ} \longrightarrow OH^{\circ} + O_2 \quad (12)$$

$$OH^{\circ} + O_3 \longrightarrow HO_4^{\circ} \quad (13)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$HO_4^{\circ} \longrightarrow HO_2^{\circ} + O_2 \quad (14)$$

การสลายตัวของไฮโดรเทตระออกไซด์แรดิคอล (Hydrotetraoxide Radical, HO_4^{o}) ไปเป็นออกซิเจนและไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคอล จะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งสารใดก็ตามที่สามารถเปลี่ยนไฮดรอกซิลแรดิคอล ไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอลหรือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคอล โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ขึ้นใหม่อีกครั้ง (Chain carrier) จะถูกเรียกว่า ตัวกระตุ้น (Promoter) โมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้และบางตัวของสารอินทรีย์จะมีกลุ่มฟังก์ชันซึ่งจะทำปฏิกิริย ากับไฮดรอกซิลแรดิคอลและทำให้เกิดแรดิคอลของสารอินทรีย์ (R^{o}) ดังสมการที่ 15

$$H_2R + OH \longrightarrow HR^{\circ} + H_2O \quad (15)$$

ถ้ามีออกซิเจนอยู่ในระบบสามารถเกิดออร์แกนิคเปอร์ออกซีแรดิคอล (Organic Peroxy Radical, ROO^{o}) ได้ ดังสมการที่ 16, 17 และ 18

$$HR^{\circ} + O_2 \longrightarrow HRO_2^{\circ} \quad (16)$$

$$HRO_2^{\circ} \longrightarrow R + HO_2^{\circ} \quad (17)$$

$$HRO_2^{\circ} \longrightarrow RO + OH^{\circ} \quad (18)$$

การสลายตัวของโอโซ นถูกเริ่มต้นโดยไฮดรอกไซด์ไอออน นำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่และผลิ ตไฮโดรอกซิลแรดิคอล ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วแสดงถึงไฮดรอกซิลแรดิคอล มีครึ่งชีวิต (Half-Life) ที่สั้นมาก ๆ เช่น น้อยกว่า 10 ไมโครวินาที (μs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10^{-4} โมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ขั้นตอนสุดท้าย (Terminal step)

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางตัว สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิล แรดิคอล ทำให้เกิดแรดิคอลลำดับที่สอง (Secondary Radical) ซึ่งไม่สร้างซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอล หรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคอล จะเรียกสารเหล่านี้ว่า ตัวยับยั้ง (Inhibitor/Scavenger) ซึ่งสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่และยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้ ดังสมการที่ 19 และ 20

$$OH^{\circ} + CO_3^{2-} \longrightarrow OH^{-} + CO_3^{\circ-} \quad (19)$$

$$OH^{\circ} + HCO_3^{-} \longrightarrow OH^{-} + HCO_3^{\circ} \quad (20)$$

ความเป็นไปไ ด้อื่นที่จะหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ คือการทำปฏิกิริยากันของแรดิคอล ดังสมการที่ 21

$$OH^{\circ} + HO_2^{\circ} \longrightarrow O_2 + H_2O \quad (21)$$

เมื่อรวมสมการทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่า 3 โมเลกุลของโอโซนจะให้ 2 โมเลกุลของไฮดรอกซิลแรดิคอล ดังสมการที่ 22

$$3O_3 + OH^{-} + H^{+} \longrightarrow 2OH^{\circ} + 4O_2 \quad (22)$$

4.6 ค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซน (O_3 half-life)

ค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซน (O_3 half-life) คือ ระยะเวลาที่สารสลายตัวเหลือครึ่งหนึ่งจากจุดเริ่มต้น โดยที่ค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซนในบรรยากาศเทียบกับอุณหภูมิจะแสดงดังตารางที่ 8 และค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซนที่ละลายในน้ำเทียบกับอุณหภูมิ ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 9 ซึ่งจะพบว่าค่าครึ่งชีวิตของโอโซนที่ละลายในน้ำมีการสลายตัวอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 ค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซนในบรรยากาศเทียบกับอุณหภูมิ

Gaseous	
Temperature (°C)	**Half-Life**
-50	3 months
-35	18 days
-25	8 days
20	3 days
120	1.5 hours
250	1.5 seconds

ที่มา: Ozone Solution (2012)

ตารางที่ 9 ค่าครึ่งชีวิตของก๊าซโอโซนที่ละลายในน้ำเทียบกับอุณหภูมิ

Dissolved In Water	
Temperature (C)	**Half-Life**
15	30 minutes
20	20 minutes
25	15 minutes
30	12 minutes
35	8 minutes

ที่มา: Ozone Solution (2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.7 ประโยชน์ของการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน

1. การใช้โอโซนในการกำจัดกลิ่นและรส ของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์และไนโตรเจน เป็นสาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นในน้ำเสีย ซึ่งแต่เดิมนิยมใช้โอโซนในการทำน้ำดื่มให้สะอาดบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปนต่าง ๆโดยเฉพาะอย่างยิ่งในแถบยุโรป (Weber, 1972) เช่น การกำจัดรสและกลิ่นในน้ำ หลังจากนั้นจึงได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้นในสหรัฐอเมริกาในด้านการประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีกลิ่นและรสอันอาจมีสาเหตุมาจากพวกจุลินทรีย์หรือกระบวนการทางเคมีที่ก่อให้เกิดสารประกอบพว กซัลเฟอร์ขึ้น โอโซนที่ความเข้มข้นน้อย ๆ ประมาณ 1.0 – 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเติมลงในน้ำก็สามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์และไนโตรเจนได้ (Lin and Yeh, 1993)

2. การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรค กระบวนการโอโซเนชันถูกนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคทั้งในน้ำดีและน้ำเสียเพราะโอโซนสามารถฆ่าแบคทีเรียในน้ำได้ อย่างรวดเร็ว โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) คล้ายกับคลอรีน แต่สามารถฆ่าไวรัสในน้ำเสียได้ด้วย แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของโอโซนยังสูงกว่าการใช้คลอรีน จึงทำให้การใช้โอโซนฆ่าเชื้อโรคจึงยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก แต่การใช้คลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ทำให้เกิดสารประกอบไตรฮาโลมีเทน (THM) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ความนิยมในการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคลดลง

นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้ เพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียจากชุมชนและภาคอุตสาหกรรม ควบคู่ไปกับการบำบัดทางกายภาพ เคมี และ ชีวภาพ เนื่องจากโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดและจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย อีกทั้งไม่ก่อให้เกิดรส กลิ่น และสารตกค้างในน้ำเหมือนการใช้คลอรีน ซึ่งย่อยสลายได้ยากและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการพัฒนากระบวนการโอโซนเนชันจึงมีผลดีกว่าในด้านการดูแลสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นการใช้โอโซนก็เป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ แม้ว่าโอโซนจะไม่ก่อให้เกิดสารประกอบไตรฮ าโลมีเทน แต่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนกับสารอินทรีย์จะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ (by products) ที่เป็นทั้ง organic by products และ inorganic by products (Glaze *et al*., 1991) By products ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อใช้โอโซนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคแสดงดังตารางที่ 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 By products ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้โอโซนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค

Disinfectant By products	
Aldehydes	Brominated Byproducts*
Formaldehyde	Bromate ion
Acetaldehyde	Bromoform
Glyoxal	Brominated acetic acids
Methhyl Glyoxal	Bromopicrin
	Brominated Acetonitriles
Acids	Aldo- and Ketoacids
Oxalic acid	Pyruvic acid
Succinic acid	Others
Formic acid	Hydrogen peroxide
Acetic acid	

หมายเหตุ *Brominated by products จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อในน้ำมี bromide ion เท่านั้น

ที่มา: Glaze *et al.* (1991)

3. การใช้โอโซนในการกำจัดสี สีของน้ำเสียโดยทั่วไปจะเกิดจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งสีของน้ำเสียแต่ละแหล่งจะแตกต่างกันตามชนิดของสารที่ปนเปื้อน สีที่เกิดจากการมีสารแขวนลอยอยู่มาก (เช่น น้ำที่ละลายดินที่เป็นตะกอนสีแดง ทำให้ขุ่นมากกว่าปกติ) เรียกว่าสีปรากฏ (Apparent color) และสีที่เกิดจากการสลายตัวของพืช (เช่น สารที่สลายตัวจากลิกนินของพืช) หรือสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ (เช่น กรดฮิวมิก) เรียกว่า สีจริง (True color) ในการบำบัดสีของน้ำเสียด้วยโอโซนจะเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี (ส่วนหนึ่งของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้) ด้วยโอโซนทำให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่ไ ม่ก่อให้เกิดสี (ไม่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้) กระบวนการ โอโซเนชันนี้สามารถลดสีลงได้ แต่ไม่ถึงกับกำจัดสีได้ 100% เช่น สามารถกำจัดสีในน้ำจากกรดฮิวมิก และกรดฟัลวิค โดยทำปฏิกิริยากับโอโซนที่มีความเข้มข้น 1-3 mg O3/mg C

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากนี้ยังมีการบำบัดสีในน้ำเสียจากโรง กลั่น ซึ่งสามารถกำจัดสีได้ประมาณ 80 % ที่ความยาวคลื่น 475 nm โดยใช้โอโซน 50 mg/hr

4. การใช้โอโซนในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส ถึงแม้ว่าเหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำจะไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ แต่ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสีในน้ำ ดังนั้นจึงมีการกำจัดเหล็กและแมงกานีสทั้งในอุตสาหกรรมน้ำดื่มและน้ำเสีย เหล็กและแมงกานีสที่พบในน้ำส่วนมากอยู่ในรูป $Fe(HCO_3)_2$ และ $Mn(HCO_3)_2$ ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสทำได้โดยการเปลี่ยนรูปของสารละลายให้อยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำแล้วนำไปกรองแยกจากน้ำ การเปลี่ยนรูปของสารที่ละลายน้ำ (Fe^{2+} และ Mn^{2+}) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ (Fe^{3+} และ Mn^{4+}) ทำได้โดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนตามสมการดังที่ (23) และ (24)

$$2Fe^{2+} \longrightarrow 2Fe^{3+} \longrightarrow Fe(OH)_3 \qquad (23)$$

$$Mn^{2+} \longrightarrow Mn^{4+} \longrightarrow MnO_2 \qquad (24)$$

การเปลี่ยนรูปของเหล็กโดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนทำได้ง่ายกว่าการเปลี่ยน รูปของแมงกานีส ซึ่งจะใช้โอโซน 4.3 mg/mg Fe^{2+}

5. การใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ โอโซเนชันสามารถที่จะกำจัดโลหะโดยออกซิไดซ์โลหะในรูปสารละลาย (Soluble form) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (Insoluble form) สามารถแยกสารเหล่านี้โดยการตกตะกอนต่อไปได้ เช่น การใช้โอโซนเพื่อออกซิไดซ์ไซยาไนด์ ในกระบวนการชุบโลหะและผลิตชิ้นส่วนอิเล็คทรอนิคจะมีไซยาไนด์ในรูปอิสระ (Free cyanide) ทำให้โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็ว

การใช้โอโซนร่วมกับด่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสามารถลดค่าพีเอช (pH) ที่ต้องการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ผลการออกซิเดชันของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 การออกซิเดชันสารอนินทรีย์โดยกระบวนการโอโซเนชัน

Compound	Products	Rate of oxidation	Remarks
Fe^{2+}	$Fe(OH)_3$	Fast	Filtration of solids required; application in the beverage industry
Mn^{2+}	$MnO(OH)_2$	Fast	Filtration of solids required; application in the beverage industry
	MnO_4^-	Fast	At higher residual ozone conc; reduction and filtration required
NO_2^-	NO_3^-	Fast	Nitrite is a toxic compound
NH_4^+/NH_3	NO_3^-	Slow at pH < 9 Moderate at pH > 9	Not relevant
CN^-	CO_2 NO_3^-	Fast	Application in waste water
H_2S/S^{2-}	SO_4^{2-}	Fast	Not relevant
As-III	As-V	Fast	Preoxidation subsequent As-removal
Cl^-	HOCl	Near Zero	Not relevant
Br^-	$HOBr/OBr^-$, BrO_3^-	Moderate	Bromination of organic compounds possible; bromate as toxic by product
I^-	HOI/OI^-, IO_3^-	Fast	Not relevant
$HOCl/OCl^-$	ClO_3^-	Slow	Loss of free chlorine
Cl,Br -amines,		Moderate	Loss of combined chlorine
ClO_2, ClO_2^-	ClO_3^-	Fast	Loss of free chlorine dioxide
H_2O_2	OH^-	Moderate	Basis of O_3/H_2O_2- process (AOP)

ที่มา: Langlais *et al.* (1991)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. การใช้โอโซนในการกำจัดอนุภาคหรือสร้างตะกอน อนุภาคคอลลอยด์ (Colloids) ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดความขุ่น (Turbidity) การกำจัดอนุภาคคอลลอยด์นี้ทำได้โดยการทำให้น้ำใส (Clarification) และการกรอง (Filtration) ซึ่งขั้นตอนการทำให้น้ำใส ประกอบด้วยการสร้างตะกอน (Coagulation) และการตกตะกอน (Sedimentation) จากการศึกษาพบว่าโอโซนจะเข้าไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ทำให้เกิด การรวมตัวกันเป็นตะกอน สามารถลดปริมาณสาร สร้างตะกอน (Coagulation) ที่เติมลงไป เช่น ลดปริมาณสารส้ม (Alum) ลงได้ 13-30 % และเพิ่มอัตราเร็วในการตกตะกอน

7. การใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ จากที่กล่าวมาข้างต้นว่า โอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียรสามารถแตกตัวได้แรดิคอลต่าง ๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ จึงมีการใช้โอโซนในการย่อยสลายพันธะของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์นั้น ๆ ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนแสดงได้ดังนี้

ก. ฟีนอล (Phenol) มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซน เพราะมีไฮดรอกไซด์ (OH) ทำให้ โอโซนสามารถออกซิไดซ์ฟีนอลได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์ได้ คาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ

ข. แนฟทาลีน (Naphthalene) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ และมีโครงสร้างสลับซับซ้อน ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยโอโซน ดังนั้นแนฟทาลีนเมื่อถูกออกซิไดซ์จะได้ Cyclic peroxide, Oxalic acid, Oxomalonic acid, Formic acid, Phthalic acid, Orthophthadialdehydic acid, Phthalaldehydic acid, Hydrogen peroxide และ1,4-Naphthoquinone

ค. สารฆ่าแมลง (Pesticides) ที่มีส่วนประกอบจากคลอรีนมักไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซน และถูกออกซิไดซ์อย่างไม่สมบูรณ์

การใช้โอโซนในการสลายพันธะของสารเคมีที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันนอกจากจะมีการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวในการบำบัดน้ำเสีย แล้วยังมีการใช้โอโซนในการบำบัดขั้นต้น (Preozonation) ก่อนที่จะทำการบำบัดทางชีววิทยา ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น

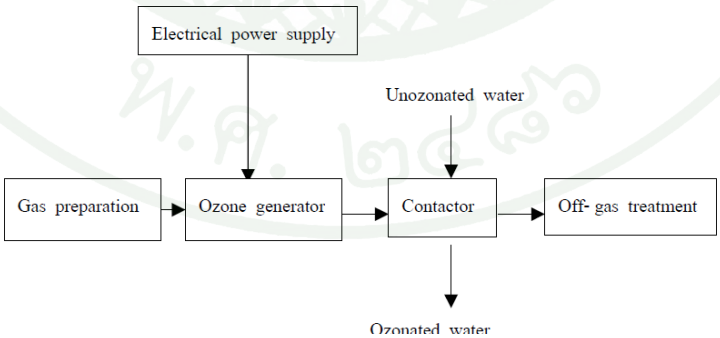
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการศึกษากระบวนการโอโซนเนชั นในการบำบัดน้ำเสีย (โดยใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย) บางครั้งอาจเกิดสารมัธยันต์ (Intermediate; สารที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ที่แท้จริงของปฏิกิริยาและมักไม่เสถียร) จากการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นพิษได้ ดังนั้นในการจะใช้ตัวออกซิแดนท์ตัวใดก็ตามเพื่อบำบัดน้ำเสียควรทราบถึงชนิดของสารอินทรีย์ (Dissolved organic matter) ที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้น คุณสมบัติทางเคมีของสารมัธยันต์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Intermediate oxidation stage) และประสิทธิภาพของตัวออกซิแดนท์ในการออกซิไดซ์สารว่าสามารถทำลายพิษของสารมัธยันต์ได้หรือไม่เพื่อให้ได้ผลการบำบัดน้ำเสียที่ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.8 ระบบการบำบัดด้วยโอโซน

4.8.1 ระบบการเตรียมก๊าซที่ให้แก่เครื่องผลิตโอโซน

โดยทั่วไป ควรต้องมีการเตรี ยมก๊าซที่จะให้แก่เครื่องผลิตโอโซน โดยอากาศต้องถูกทำให้แห้ง เพื่อป้องกันการเกิดกรดไนตริก (Nitric acid) และเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิต เนื่องจากความชื้นจะเป็นตัวเร่งการสลายตัวของโอโซนและกรดไนตริกจะถูกสร้าง ขึ้น เมื่อก๊าซไนโตรเจนรวมตัวกับความชื้นใน โคโรนาดิสชาร์ จ (Corona discharge) อุปกรณ์จะกัดกร่อน (Cheremisinoff *et al*., 1981) จึงไม่ควรนำอากาศชื้นเข้าสู่ระบบ องค์ประกอบของระบบการบำบัดด้วยโอโซนโดยพื้นฐาน มีรูปแบบแสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ระบบการบำบัดด้วยโอโซน

ที่มา: Cheremisinoff *et al*. (1981)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระบบการเตรียมก๊าซ ปกติจะประกอบด้วยการทำความเย็นให้แก่ก๊าซ (Refrigerant gas cooling) และการทำให้แห้ง (Desiccant drying) เพื่อทำให้จุดควบแน่นมีค่าต่ำสุด คือ -40 องศาเซลเซียส โดยอาจมีเครื่องวัดความชื้นของอากาศ (Hygrometer)

ประสิทธิภาพการผลิตโอโซน จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ออกซิเจนแทนอากาศ (1-3% ในอากาศ และ 2-6 % ในออกซิเจน) การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (High purity oxygen) ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมดูปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำที่จะบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดที่ต้องการ

4.8.2 ระบบกำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบและกำลังการผลิตโอโซน เป็นสัดส่วนกับค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้าและความถี่ ดังนั้นการควบคุมกำลังการผลิตของโอโซน สามารถทำได้โดยการปรับค่าความศักย์ไฟฟ้า และความถี่ รูปแบบของระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ที่ขายทั่วไป มี 3 แบบคือ ค่าความถี่ต่ำ (60 Hz) แต่ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, ค่าความถี่ปานกลาง (600 Hz) แต่ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่แต่ปรับค่าความถี่ รูปแบบความถี่ที่ใช้มากที่สุดคือค่าความถี่ต่ำคงที่แต่ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า สำหรับระบบใหญ่ขึ้นจะใช้ค่าความถี่ปานกลาง (600 Hz) ซึ่งให้การผลิตโอโซนเป็นสองเท่าโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของเครื่องผลิตโอโซน

4.8.3 เครื่องผลิตโอโซน

การผลิตโอโซน โดยกระบวนการ โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในระดับโรงงาน (Plant-scale) เนื่องจากสามารถผลิตโอโซนได้ความเข้มข้นสูง ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วง 9 – 19 kV (Lin and Yeh, 1993)

4.8.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสัมผัสกันระหว่างโอโซนกับน้ำที่จะบำบัด

หลัง โอโซนถูกผลิตโอโซนและน้ำที่จะบำบัดจะผสมกันในถังสัมผัส (Contactor) หรือ ถังปฏิกรณ์ (Reaction reactor) เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการละลายและการสัมผัสของโอโซนในน้ำให้มากที่สุด โดยใช้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับพลังงานต่ำสุด อาจมีการใช้อุปกรณ์เพิ่มเพื่อให้เกิดการละลายของก๊าซมากที่สุดเช่น เครื่องผสมทางกล (Mechanical mixer) เครื่องผสมที่อยู่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กับที่ (Static mixer) หัวพ่นอากาศ (Diffusers) เครื่องพ่น (Injector) หรือ Packed หรือ Bubble column

วิธีการสัมผัสกันของโอโซนกับน้ำ (Contaction ozone with water) ส่วนใหญ่เป็นการผ่านก๊าซที่ประกอบด้วยโอโซน (Ozone containing gas) ลงไปในของเหลว ก่อให้เกิดฟองก๊าซในของเหลว ถ้าก๊าซถูกส่งผ่านหัวพ่น (Bubble diffuser) จะได้ฟองก๊าซขนาดใหญ่ แต่ถ้าใช้แบบเทอร์ไบน์ (Turbine contactor) จะได้ฟองก๊าซขนาดเล็กกว่ามากทำให้ต้องใช้พลังงานในการเกิดเป็นเนื้อเดียวกันของก๊าซในน้ำมากกว่าการใช้หัวพ่นอากาศ

หัวพ่น (Diffuser) นิยมใช้มากสุด เนื่องจากให้อัตราการถ่ ายเทก๊าซสูง (70 เปอร์เซ็นต์) และใช้พลังงานต่ำ โดยสามารถแพร่โอโซน 1-1.5 กิโลกรัมต่อพลังงานหนึ่งกิโลวัตต์ที่ใช้ แต่ในการบำบัดน้ำดิบ (Raw water) อาจมีอนุภาคขนาดใหญ่เกาะติดและอุดตัน เนื่องจากหัวพ่นอุดตันได้ง่ายดังนั้นก ารใช้เทอร์ไบน์ (Turbine) หรือเครื่องกวน (Mixture) จึงเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำดิบ

หากต้องการประสิทธิภาพการแพร่สูงกว่าหัวพ่น ก็ต้องใช้เครื่องผสมทางกล (Mechanical mixer) ในถังสัมผัส โดยให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โอโซนผ่านลงสู่แกนของเครื่องกวนและเข้าสู่ใบพัดน้ำที่บำบัดจะถูกสัมผัสกับโอโซนซ้ำแล้วซ้ำอีกทำให้ประสิทธิภาพสูง

ปัจจัยในการออกแบบถังสัมผัส ประกอบด้วย

- ความต้องการโอโซนในน้ำ (Ozone demand of water)

- พฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic) ในถังสัมผัส

- กฎทางไคเนติกส์ของปฏิกิริยา (Kinetic law of the reactions)

- การถ่ายเทมวลของโอโซน (Ozone mass transfer)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การสัมผัส การแพร่ของโอโซนจากสถานะก๊าซไปยังสถานะของเหลว จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับผลของตัวแปรเช่น ความหนืดของน้ำ อุณหภูมิ แต่ที่สำคัญสุดคือปริมาณของสารที่ต้องการโอโซนที่มีอยู่ในน้ำ ถ้าความเข้มข้นขอ งสารที่ต้องการโอโซนมีค่าสูงขึ้น อัตราการแพร่ของโอโซนลงสู่น้ำก็จะสูงด้วย

4.9 ระบบกำจัดโอโซนเหลือใช้

เนื่องจากโอโซน เป็นสารออกซิแดนท์ที่แรงและเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ ถ้าได้รับในระดับความเข้มข้นสูงเป็น ระยะเวลานาน องค์การจัดการความปลอดภัยและสุขภาพของประเทศสหรัฐอเมริกา (The U.S. Occupational Safety and Health Administration) จึงได้กำหนดความเข้มข้นของโอโซนควรต่ำกว่า 0.1 ppm ก่อนที่จะปล่อยออก ดังนั้นจึงไม่ควรปล่อยโอโซนออกจากเครื่องผลิตโอโซนและถังสัมผัส (Contactor vessel) เข้าสู่บรรยากาศโดยไม่ถูกกำจัดเสียก่อน

การกำจัดก๊าซโอโซนที่ออกจากระบบบำบัดทำได้หลายวิธี เช่น การเจือจาง (Dilution) ก๊าซโอโซนให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย การใช้ตัวเร่ง (Catalytic) โดยใช้แมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide) หรืออลูมิเนียมชุบพัลลาเดียม (Palladium coatedalumina) และทำลายโอโซนที่อุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียส การนำโอโซนกลับไปใช้ในระบบใหม่ (Recycle) การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ การใช้ความร้อน (Thermal-destruction units) เนื่องจากโอโซนสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง การกำจัดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ก๊าซขาออกควรอยู่ใน Thermal unit เป็นเวลา 3-5 นาที เพื่อให้กระบวนการมีประสิทธิภาพ

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยพบว่า โอโซนสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ลดสี ลดความเป็นพิษและเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารอินทรีย์นั้น ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

Koch *et al.* (2002) ศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสีย้อม Reactive Yellow 84 ซึ่งนิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยในการทดลองใช้สีย้อมสังเคราะห์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการเป็นตัวอย่าง ผลการทดลองพบว่าการบำบัดสีย้อมโดยสมบูรณ์ใช้เวลา 60 และ 90 นาที ที่ปริมาณโอโซนเท่ากับ 18.5 และ 9.1 mg/L ตามลำดับ อัตราส่วน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

TOC/TOC_0 ภายหลังการบำบัด มีค่า 30% ค่าซีโอดีลดลง 50% ส่วนอัตราส่วนระหว่าง BOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 0.8 นอกจากนี้งานวิจัยศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา พบว่า เมื่อหมู่ฟังก์ชันเอโซเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการแตกตัวจะได้เป็นไนเทรต การแตกตัวหมู่ฟังก์ชัน กรดซัลโฟนิควงแหวนอะโรมาติกทำให้ เกิดปริมาณซัลเฟต กรด ฟอร์มิก และกรดซัลโฟนิคในวงแหวนอะโรมาติกเพิ่มขึ้น

Zhu and Xu (2004) ได้ทำการทดลองใช้โอโซนร่วมกับ Fe^{3+} เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียฟีนอลสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยให้ปริมาณโอโซน 3 กรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณ Fe^{3+} และค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล ประสิทธิภาพในการลด COD เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Fe^{3+} เพิ่มขึ้นและ ที่พีเอช 2.8 เป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมของกระบวนการ Fe^{3+}/O_3system นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดส่วนใหญ่ได้แก่ Maleic acid, Benquenze และ Oxalic acid ปริมาณ Oxalic acid ที่ตรวจวัดได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น

Coca *et al.* (2007) ศึกษาจลนศาสตร์ของโอโซเนชันในน้ำเสียจากกระบวนการหมักกากน้ำตาลโดยได้กระทำในถังปฏิกรณ์แบบกวนเพื่อให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมีอัตราคงที่ ซึ่งมีค่าคงที่ในการทดลองคือ pH 8.7 ที่อุณหภูมิ 25 ºC และมีอัตราการปั่นกวนและอัตราการไหลเข้าของแก๊สตั้งแต่ $0.6x10^{-7}$ ถึง $3.8x10^{-7}$ L mol^{-1} s^{-1} ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการปั่นกวนและอัตราการไหลเข้า พารามิเตอร์ที่ศึกษาคือการถ่ายโอนมวลและการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะพบว่าอัตราการปั่นกวนและอัตราการไหลเข้าของแก๊สมีผลต่อการถ่ายโอนมวล ซึ่งได้ทำการทดลองกับสารละลายที่เป็น organic-free จะเห็นได้ว่าปริมาณของโอโซนที่ละลายได้จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยคือ 0.94-0.98 mg O_3/L เมื่ออัตราการปั่นกวนเพิ่มขึ้น 100-200 รอบ/นาที และเมื่อเพิ่มอัตราการปั่นกวนเป็น 200-400 รอบ/นาที พบว่าปริมาณของโอโซนที่ละลายได้จะคงที่ และนอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายได้จะเพิ่มขึ้นเป็น 0.98-1.48 mg O_3/L เมื่ออัตราการไหลเข้าของแก๊สลดลง 200-100 L/h และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำกากน้ำตาลพบว่าเมื่ออัตราการปั่นกวนและอัตราการไหลเข้าของแก๊สแตกต่างกันโอโซนจะบำบัดสีของ น้ำเสียได้ดีขึ้นซึ่งดูได้จากระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่ค่าการดูดกลืนแสง 475 nm จะพบว่าสีจะลดลงอย่างมีประสิทธิภาพหลังจาก ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 25 นาที ร้อยละของการลดลงของสีประมาณ 70-75 % และเพิ่มขึ้นถึง 85-87 % หลังจากการพ่นโอโซน 40 นาที และมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและสีเมลานอยดินในน้ำเสีย จะเป็นปฏิกิริยาแบบ pseudo-first order ภายในฟิล์มของเหลว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sreethawong and Chavadej (2007) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานผลิตสุราด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มีและไม่มีไอรอนออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยน้ำเสียจากโรงงานผลิตสุราใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ก่อให้เกิดน้ำกากส่ามีสีน้ำตาลเข้มที่เป็นผลจากสารเมลานอยดิน การทดลองเจือจางน้ำเสีย 20 เท่า ค่าซีโอดีและบีโอดีเริ่มต้น 106,500 mg/L และ 31,600 mg/L ตามลำดับ ค่าพีเอช 5.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ ไอรอนออกไซด์ในรูปเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (continuous) อัตราการผลิตโอโซน 20 g/L กำลังงานสูงสุด 1144 W การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและค่าซีโอดีของระบบโอโซเนชันที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าการเพิ่มกำลังงานที่ส่งเข้าเครื่องผลิตโอโซนจะเพิ่มปริมาณโอโซนในระบบ โดยที่ 572-860 W ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีและสีเพิ่มสูงขึ้นจาก 40% เป็น 80% และ 30% เป็น 40% ตามลำดับ การเพิ่มอัตราการไหลของมวลโอโซนทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหล 0.5-1 g/h ส่วนการที่อัตราการไหลของของเหลวในระบบสูง ทำให้การลดค่าซีโอดีและสีลดลงจาก 60% เหลือ 10% และจาก 40% เหลือ 10% ตามลำดับ เนื่องจากเวลาในการสัมผัสกับโอโซนสั้นลงทำให้ความสามารถในการออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ลดลง การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและค่าซีโอดีของระบบโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ (HRT) และอัตราการไหลของโอโซนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดค่าซีโอดีและการกำจัดสี ที่ระยะเวลากักเก็บ 18 นาที อัตราการไหลของโอโซน 4.64 g/h การกำจัดสีสูงถึง 90% และ การลดค่าซีโอดี 70% ซึ่งในการกำจัดสีจะเกิดสมบูรณ์ที่ระยะเวลากักเก็บประมาณ 30 นาที และการทดลองด้วยโอโซนร่วมกับไอรอนออกไซด์ทำให้เกิดการสร้าง hydroxyl free radical เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์เร็วขึ้น

Chen *et al*. (2009) ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้ Ozone ในการลดสีในน้ำเสียโดยใช้สีย้อมรีแอคทีฟเกรดการค้า 2 สี คือ Reactive Blue 19 และ Reactive Orange 13 ในการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดคือ ปริมาณโอโซน ระยะเวลาทำปฏิกิริยา ใช้ถังปฏิกิริยาขนาด 14 ลิตร ผลการทดลองพบว่า การกำจัดสีลดจาก 2000 ADMI เป็น 200 ADMI ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ให้โอโซนที่อัตรา 2.66 g/hr ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสี Reactive Blue 19 คือพีเอชเท่ากับ 3 และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสี Reactive Orange 13 คือที่พีเอชเท่ากับ 10 การทำปฏิกิริยาของโมเลกุลโอโซนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอลจะเกิดได้ดีที่พีเอชต่ำ โดยโมเลกุลของโอโซนมีความจำเพาะเจาะจงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโครงสร้างสีย้อม การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของ Reactive Blue 19 และ Reactive Orange 13 เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Lu *et al.* (2009) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอคทีฟ (Brilliant Red X-3B) โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดได้แก่ พีเอช ปริมาณโอโซน เวลาที่ใช้สัมผัสต่อประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี ประสิทธิภาพของโอโซนที่ทำให้สารย่อยสลายทางชีวภาพได้ จากการศึกษา พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ ที่พีเอช 11 ปริมาณโอโซนที่ใช้ คือ 43.08 mg/L ที่เวลา 120 นาที ค่าBOD_5/COD มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.102 เป็น 0.406 และในการใช้ระบบ Upflow Biological Aerated Filter (UBAF) ร่วมด้วย ทำให้ค่าซีโอดีลดลง ภายใต้สภาวะของค่าอัตราส่วนที่เป็นของแข็งต่ออัตราส่วนที่เป็นของเหลวเท่ากับ 3 ค่าภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 4.8 m^3/m^2.d ที่อุณหภูมิ 20-25 ºC อัตราส่วนของโอโซนต่อสีย้อมเท่ากับ 4.5 ที่พีเอช 11 ค่าซีโอดีและความเข้มข้นสีย้อมที่ออกมาจากกระบวนการคือ 40 mg/L และ 20 หน่วย Pt-Co ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีเท่ากับ 97 % และ 90% ตามลำดับ

de Souza *et al.*(2010) งานวิจัยนี้ศึกษาการลดค่าซีโอดีและสีจากการไฮโดรไลซ์ สีย้อมเอโซในอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการโอโซเนชันและการบำบัดทางชีวภาพ ในการศึกษา ใช้สีย้อม Remazal Black B ซึ่งทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous) ที่ค่าพีเอช 3-11 พบว่าโอโซนสามารถกำจัดสีได้ในทุกพีเอช ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากกว่า 96% การศึกษาผลของพีเอช พบว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมที่ความเข้มข้นของสีย้อม 500 mg/L ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่พีเอชต่าง ๆ ลดลงโดยแปรผันกับเวลาที่เพิ่มขึ้นของการโอโซเนชัน การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาพบว่าการกำจัดสีย้อมเอโซในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดทางชีวภาพจากการไฮโดรไลซ์สีย้อมเอโซที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100, 250 และ 500 mg/L โดยอาศัยมวลจุลินทรีย์ในการสร้างไบโอฟิล์ม (Biofilm) เพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ จากการศึกษาพบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนช่วย เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ การวิเคราะห์ความเป็นพิษด้วย *Daphnia magna* พบว่ากระบวนการโอโซเนชันเป็นการทำให้น้ำเสียมีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำมากขึ้น เมื่อเทียบกับน้ำเสียเริ่มต้น แต่ภายหลังจากการบำบัดทางชีวภาพสามารถลดความเป็นพิษของน้ำเสียลงได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

    1.1 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) ยี่ห้อ OZZON รุ่น OZ-6501T
    1.2 เครื่องวัดค่า pH (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 8424
    1.3 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-2800
    1.4 เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography) ยี่ห้อ Shimadzu
    1.5 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ค่า Acetaldehyde
    1.6 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ค่า BOD
    1.7 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ค่า COD
    1.8 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Precisa รุ่น 240A
    1.9 ตู้อบ (Hot air oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED53/E2
    1.10 Automatic pipette aid
    1.11 เครื่องแก้วสำหรับงาน Volumetric analysis
    1.12 ถังปฏิกิริยา (Reactor) และหัวกระจายก๊าซ (Gas diffuser)
    1.13 เครื่องสูบน้ำสำหรับป้อนน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา



ภาพที่ 15 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) ของ OZZON รุ่น OZ-6501T

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

2.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์อัตราการผลิตโอโซน

2.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์อัตราการละลายน้ำของโอโซน

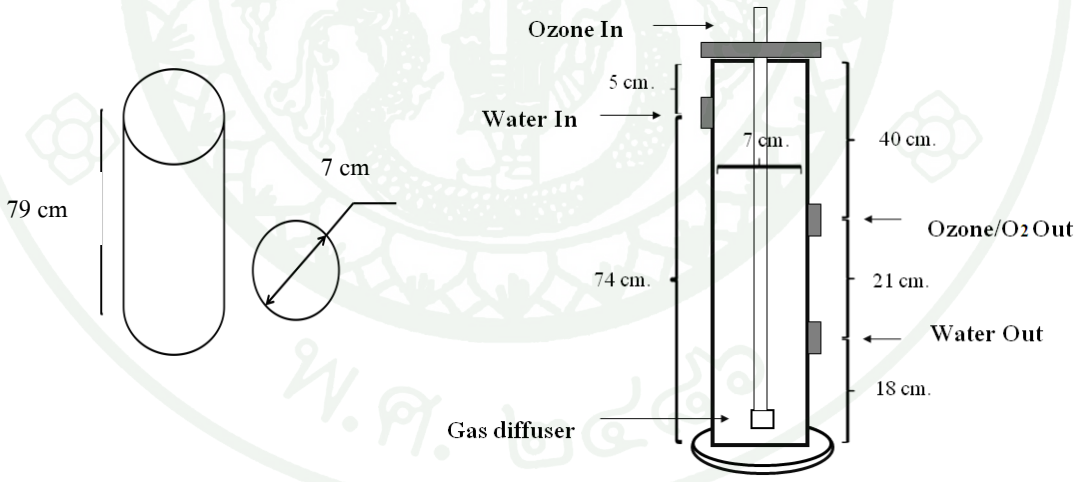
2.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ COD

2.4 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่า BOD

2.5 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์

3. ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

ในการเดินระบบทั้ง แบบแบตช์ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) จะใช้ ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิค ม้วน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 79 เซนติเมตร ปริมาตรน้ำในถัง 1 ลิตร ปริมาตรของถัง 3.04 ลิตร หรือ 3.04×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร มีจุดน้ำเข้า-ออก และ โอโซนเข้า-ออก แสดงดังภาพที่ 16

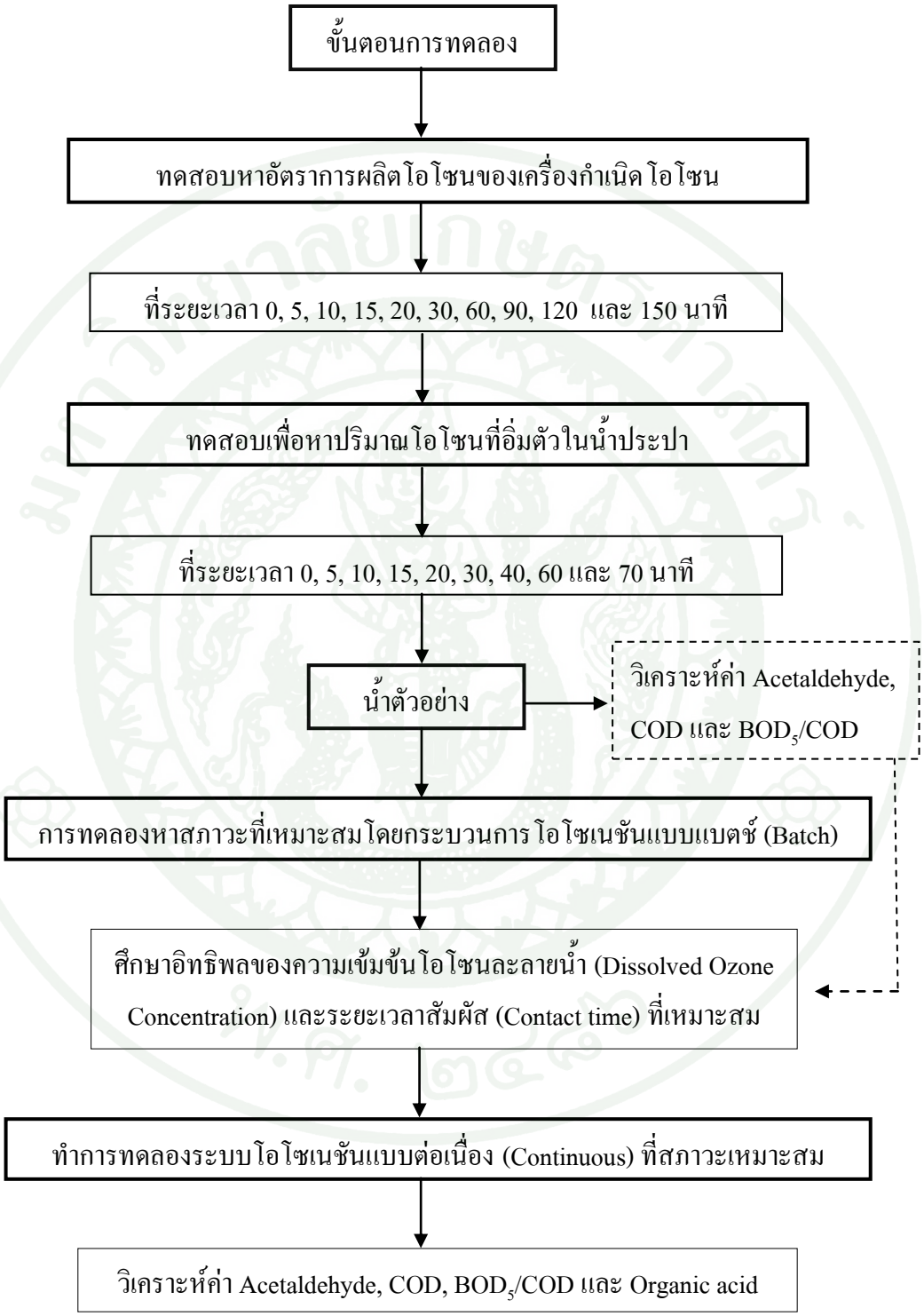


(ก) ภาพทรง และ ขนาดถัง (ข) องค์ประกอบของถัง

ภาพที่ 16 แบบจำลองถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์

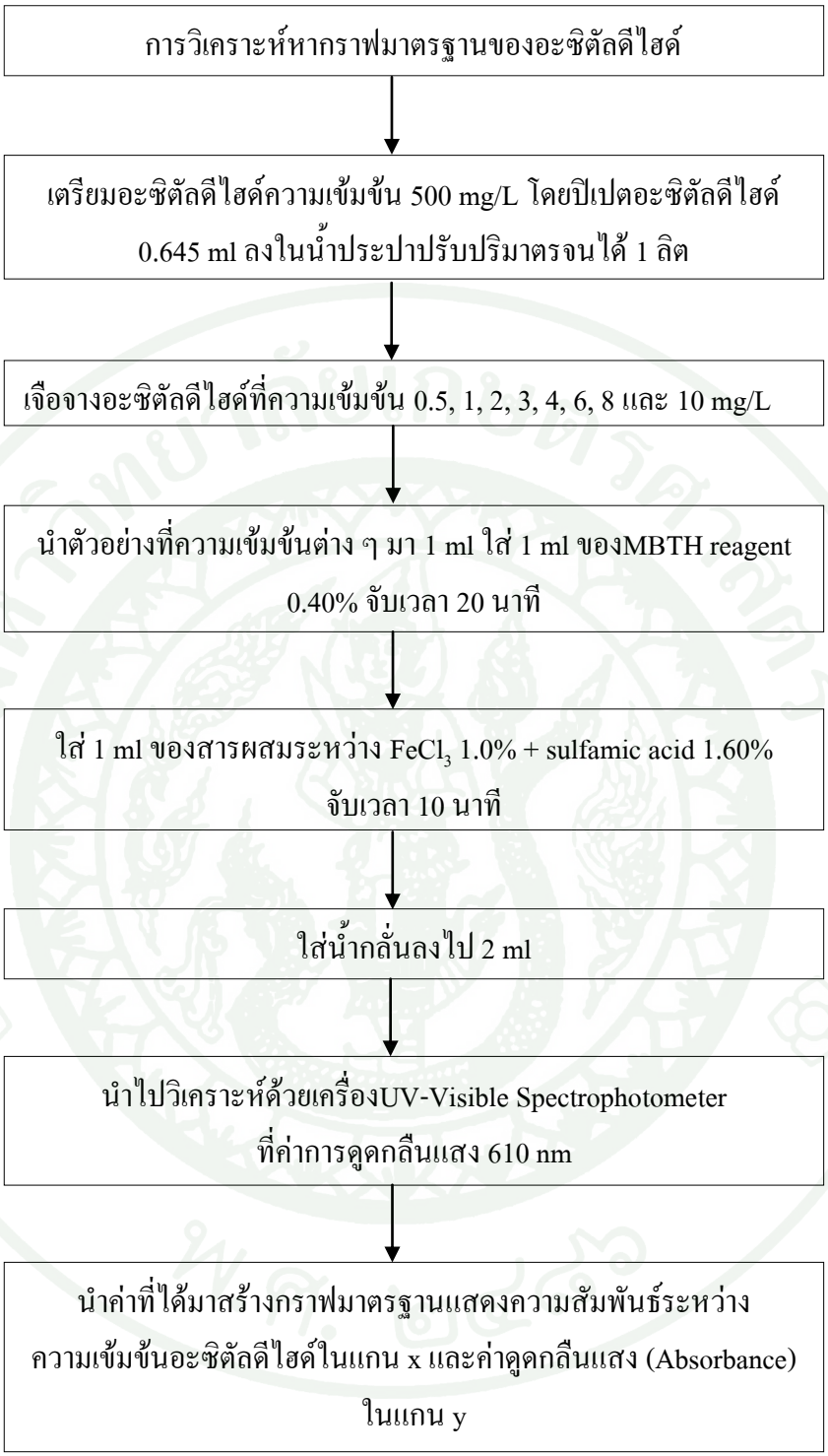
น้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัล ดีไฮด์ที่ใช้ในการทดลอง ทำการเตรียมจากอะซิตัลดีไฮด์ (99% pure Acetaldehyde มวลโมเลกุล 44.05 g/mol, ความหนาแน่น 0.785 g/ml) เตรียมที่ความเข้มข้น 500 mg/L โดยปิเปตอะซิตัลดีไฮด์ 0.645 ml ลงในน้ำประปาปรับปริมาตรจนได้ 1 ลิตร จากนั้นเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยนำมาเจือจางด้วยน้ำประปาให้ได้ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ที่ใช้ในการบำบัด 10, 25 และ 50 mg/L

2. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ก่อนและหลังบำบัด ทำโดยวิธี การย้อมสีของอะซิตัลดีไฮด์ด้วยสาร 3-methyl, 2-bezothiazolinone hydrazone hydrochloride reagent (MBTH) และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 610 nm จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของอะซิตัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 0-10 mg/L ตามวิธีของ IUPAC (1979) วิธีการเตรียมกราฟมาตรฐานของอะซิตัลดีไฮด์วิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

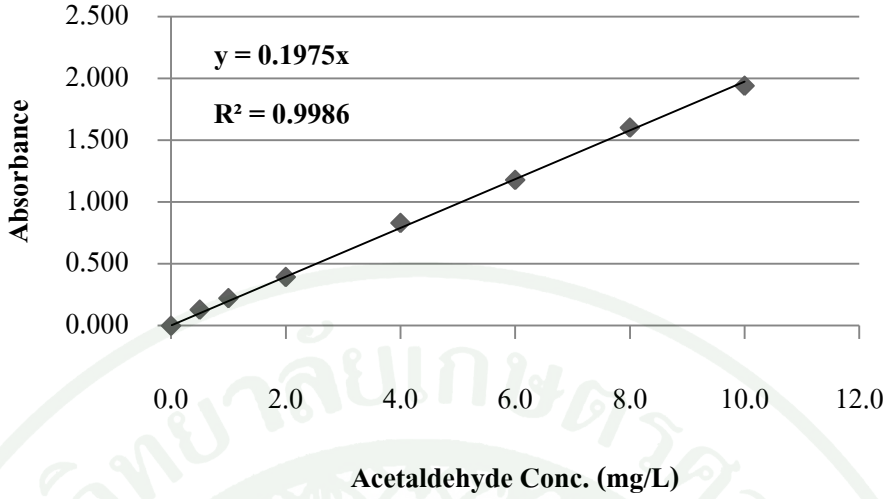
เตรียมอะซิตัลดีไฮด์ (99% pure Acetaldehyde) ที่ความเข้มข้น 500 mg/L โดยปิเปตอะซิตัลดีไฮด์ 0.645 ml ลงในน้ำประปาปรับปริมาตรจนได้ 1 ลิตร จากนั้นเตรียมอะซิตัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 และ 10 mg/L โดยเจือจางจากที่ความเข้มข้น 500 mg/L นำตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มา 1 ml ใส่ 1 ml ของMBTH reagent 0.40% จับเวลา 20 นาที จากนั้นใส่ 1 ml ของสารผสมระหว่าง $FeCl_3$ 1.0% + sulfamic acid 1.60% จับเวลา 10 นาที หลังจากนั้นใส่น้ำกลั่นลงไป 2 ml นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องUV-Visible Spectrophotometer ที่ค่าการดูดกลืนแสง 610 nm นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น อะซิตัลดีไฮด์ในแกน x และค่าดูดกลืนแสง (Absorbance) ในแกน y ขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 18 และกราฟมาตรฐาน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ที่ค่าต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 19 สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างทำวิธีการ เช่นเดียวกับการหากราฟมาตรฐาน ถ้าตัวอย่างมีความเข้มข้นสูงกว่าช่วงค่า 0-10 mg/L จะต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่างก่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 ขั้นตอนการวิเคราะห์หากราฟมาตรฐานของอะซิตัลดีไฮด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



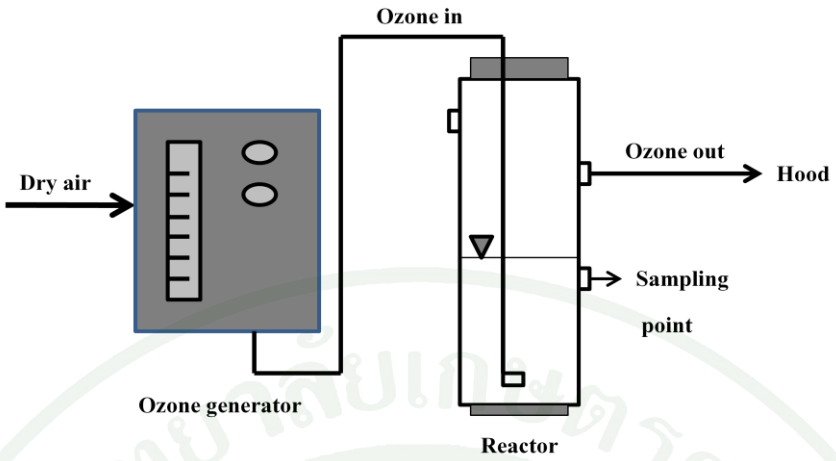
ภาพที่ 19 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) กับความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ที่ค่าต่าง ๆ

3. การเดินระบบโอโซเนชัน

3.1 การเดินระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)

ในการทดลอง เดินระบบ โอโซเนชัน แบบแบตช์ (Batch test) ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ปริมาตร 1 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยา จากนั้นต่อเครื่องกำเนิด โอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T โดยอากาศภายนอกจะผ่านเข้าสู่เครื่องกำเนิดโอโซนที่มีอัตราการไหลเข้าของอากาศ (Air flow) คงที่ 3.5 ลิตรต่อนาที ก๊าซ โอโซนที่เกิดขึ้นจะถูกส่ง ผ่านเข้าสู่ถังปฏิกิริยาผ่านหัวกระจายก๊าซ (Gas diffuser) ที่อยู่บริเวณด้านล่างถัง ก๊าซโอโซนมีลักษณะเป็นฟองอากาศจะสัมผัสกับน้ำเสีย ทำให้เกิดการปั่นป่วนภายในถัง และเกิดการผสมกันภายในอย่างทั่วถึง สามารถเก็บตัวอย่างได้ที่จุดน้ำออกจากระบบตามระยะเวลาที่ต้องการ ขณะที่ก๊าซโอโซนที่ออกจากระบบ จะต่อเข้ากับตู้ดูดควัน (hood) ก่อนปล่อยสู่อากาศภายนอก ดังภาพที่ 20 แสดงแผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชัน แบบแบตช์ และภาพที่ 21 แสดงเครื่องมือทดลองระบบโอโซนเนชันแบบแบตช์ (batch)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 20 แสดงแผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)

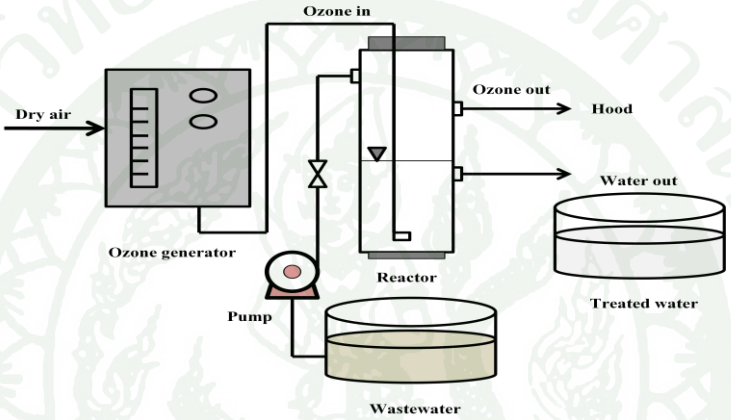


ภาพที่ 21 ภาพแสดงเครื่องมือทดลองระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (continuous)

การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (continuous) ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ในถังพักน้ำเสียปริมาตร 10 ลิตร จากนั้นใส่น้ำเสียลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 1 ลิตร ต่อเครื่องกำเนิดโอโซนเหมือนกับข้อ 3.1 และต่อปั๊มน้ำเสียจากถังพักน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา โดยให้น้ำเสียผ่านปั๊มเข้าสู่ถังปฏิ กิริยาที่อัตราการไหลที่ทำให้ระดับน้ำเสียในถังปฏิกิริยาคงที่ที่ 1 ลิตร ทำการบำบัดด้วยโอโซน และเก็บตัวอย่างที่จุดรับน้ำทิ้งออกนอกระบบ ดังภาพที่ 22 และ 23



ภาพที่ 22 แสดงแผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test)



ภาพที่ 23 ภาพแสดงเครื่องมือทดลองระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การศึกษาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone Generator)

การศึกษาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิด โอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T ที่อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบคงที่ 3.5 L/min ในการทดลองจะทำการหาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ในเวลาต่าง ๆ กัน ด้วยวิธี Iodometric method โดยการผ่านก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ เข้าสู่ขวดดัก จับก๊าซโอโซนซึ่งภายในบรรจุ สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% (KI 2%) โดยจะดักจับก๊าซโอโซนทั้งหมดในระบบ หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ หาปริมาณโอโซน โดยการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ทฤษฎีและวิธีวิเคราะห์แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ทฤษฎี

การศึกษานี้ตรวจวัดปริมาณโอโซนโดยใช้วิธี Iodometric Method (APHA, 2005) อาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซน (O_3) และไอโอไดด์ (I^-) จากสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ที่ไม่มีสีเกิดเป็นไอโอดีนอิสระ (liberated iodine, I_2) ที่มีสีเหลืองหรือส้ม (ถ้าปริมาณโอโซนมากจะได้สีส้มแดง) โดยปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและไอโอไดด์ แสดงดังสมการที่ 25

$$\underset{\text{ไม่มีสี}}{O_3 + 2KI + H_2O} \longrightarrow \underset{\text{สีเหลืองหรือส้ม}}{O_2 + I_2 + 2KOH} \qquad (25)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าไอโอดีนอิสระ (liberated iodine, I_2) ที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยา การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนทำได้โดย Volumetric Analysis โดยทำการไทเทรตไอโอดีนอิสระ(liberated iodine, I_2) ที่เกิดขึ้นด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) จนกระทั้งสีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลือ งอ่อน จากนั้นจึง ใช้น้ำแป้ง (starch) เป็นอินดิเคเตอร์ (indicator) สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และไทเทรตจนก ระทั่งไม่มีสี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 26

$$\underset{\text{สีเหลืองหรือส้ม}}{I_2 + 2Na_2S_2O_3} \xrightarrow[\text{สีน้ำเงิน}]{\text{น้ำแป้ง}} \underset{\text{ไม่มีสี}}{2NaI + Na_2S_4O_6} \qquad (26)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ที่ใช้ไปจะสมมูลย์กับโอโซนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่แสดงในสมการ ที่ 26 ปริมาณโอโซนสามารถคำนวณได้จากปริมาณสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ที่ใช้ไปดังสมการที่ 27

$$\text{Ozone (mg)} = (A+B) \times N \times 24 \qquad (27)$$

หมายเหตุ A = ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต Trap A (ml)

B = ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต Trap B (ml)

N = Normality ของโซเดียมไธโอซัลเฟต

24 = มาจาก O_3 1 mol ทำปฏิกิริยากับ KI เกิดเป็น I_2 1 mol ต้องใช้ $Na_2S_2O_3$ 2 mol ดังนั้นที่ 1 mol ของ $Na_2S_2O_3$ จะใช้ O_3 (MW. 48 g/mol) เท่ากับ (48/2) = 24

การหาอัตราการผลิตโอโซนในหน่วยมิลลิกรัมต่อ ชั่วโมง และปริมาณโอโซนต่ออากาศในหน่วยความเข้มข้นมิลลิกรัมต่อลิตรของอากาศ แสดงดังสมการที่ 28 และ 29

$$\text{Ozone (mg/hr)} = \frac{(A+B) \times N \times 24}{T\ (\text{min})} \times \left(\frac{60\text{min}}{1\text{hr}}\right) \qquad (28)$$

หมายเหตุ A = ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต Trap A (ml)

B = ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต Trap B (ml)

N = Normality ของโซเดียมไธโอซัลเฟต

T = ระยะเวลาที่เครื่องเดินระบบ (min)

$$\text{ปริมาณโอโซนต่ออากาศ (mg/L)} = \frac{(A+B) \times N \times 24}{T\ (\text{min})} \times \frac{1}{\text{Air flow (L/min)}} \qquad (29)$$

หมายเหตุ A = ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเตรต Trap A (ml)

B = ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเตรต Trap B (ml)

N = Normality ของโซเดียมไธโอซัลเฟต

T = ระยะเวลาที่เครื่องเดินระบบ (min)

Air flow = อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ (L/min)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขั้นตอนการวิเคราะห์

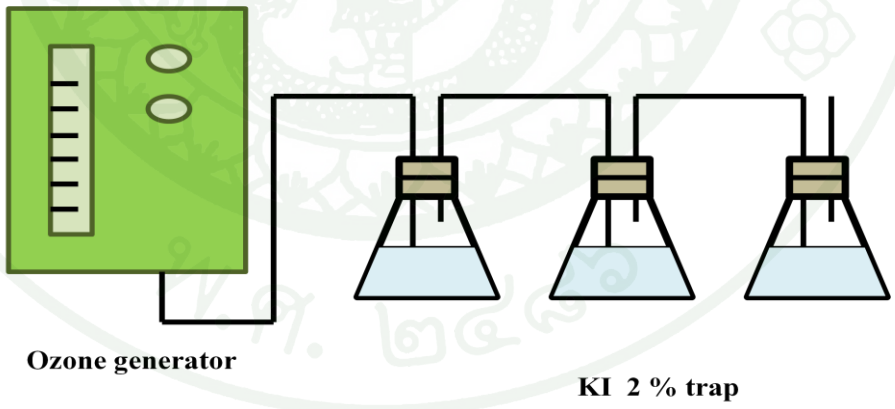
4.1 เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2 % 200 ml ใส่ในภาชนะปิดจำนวน 2 ขวดต่ออนุกรมกัน (Trap A และ Trap B) จากนั้นให้เติมโอโซนลงไปในสารละลายเป็นเวลา 5 นาที สีของสารละลายจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม เฝ้าระวังไม่ให้ Trap B เป็นสีเหลือง ถ้ามีสีเหลืองให้ต่อ Trap C เพิ่ม ดังภาพที่ 24

4.2 นำสารละลาย KI 2% ที่ได้จากข้อ 4.1 มาเติม 10 ml กรดซัลฟูริค (H_2SO_4) ความเข้มข้น 2 N ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ความเข้มข้น 0.1 N

4.3 ไทเทรตจนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้ง 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ สีของสารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน จากนั้นไทเทรตต่อที่จุดยุติจะได้สารละลายใสไม่มีสี

4.4 บันทึกค่าปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ นำไปคำนวณปริมาณโอโซน

4.5 ทำซ้ำที่ระยะเวลาสัมผัส 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90, 120 และ 150 นาที



ภาพที่ 24 แสดงการหาอัตราผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การศึกษาปริมาณโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปา

การศึกษา ปริมาณ โอโซน ที่อิ่มตัว ในน้ำประปา ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายโพแทสเซียม - ไอโอไดด์ 2% (KI 2%) ในการดักจับโอโซนที่ อิ่มตัวในน้ำประปาที่ระยะเวลาเติมโอโซน ต่าง ๆ กัน ในการทดลองทำการเดินระบบโดยเติมก๊าซโอโซนผ่านลงไปในน้ำประปาที่ปริมาตร 100, 200 และ 300 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟต และคำนวณหาความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำประปาต่อไป

ขั้นตอนการวิเคราะห์

5.1 เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 % ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 150 มิลลิลิตร และ เตรียมน้ำประปาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 150 มิลลิลิตร จากนั้นต่อเครื่องกำเนิดโอโซนและหัวฟู่ลงไป ดังภาพที่ 25

5.2 พ่นโอโซนที่ระยะเวลา 5 นาที แล้วทำการปิดเครื่องโอโซน จากนั้นเทน้ำประปาที่พ่นโอโซนลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 % อย่างรวดเร็ว ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน เติมกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) 2 N ลงไป 1.25 มิลลิลิตร

5.3 ทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.005 N จนได้สีเหลือง จากนั้นใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ สีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ทำการไทเทรตต่อที่จุดยุติได้สารละลายใสไม่มีสี

5.4 ทำการทดลองซ้ำข้อ 5.1 ถึง 5.4 ที่เวลาพ่นโอโซน 10, 15, 20, 30, 40, 60 และ 70 นาที และทดลองซ้ำที่เวลาต่าง ๆ โดยแปรค่าปริมาตรน้ำประปาที่ 200 และ 300 ml ตามลำดับ

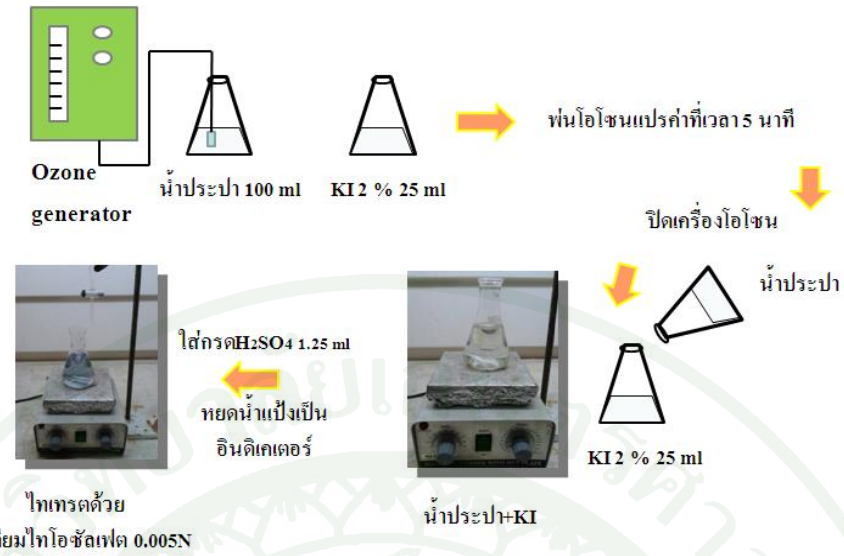
5.5 คำนวณความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ (Dissolved ozone concentration) สมการที่ 30

$$\text{ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ (mg/L)} = \frac{\text{(ปริมาตรไทเทรต x N x 24)}}{\text{ปริมาตรน้ำประปา (L)}} \qquad (30)$$

หมายเหตุ N = Normality ของโซเดียมไธโอซัลเฟต

24 = โอโซน (Mw=48) 1mol สมมูลย์กับ $Na_2S_2O_3$ 2 mol (ดังนั้นที่ 1 mol =24)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 25 ขั้นตอนการหาปริมาณโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปา

6. การศึกษากระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในสภาวะแบบแบตช์ (Batch test)

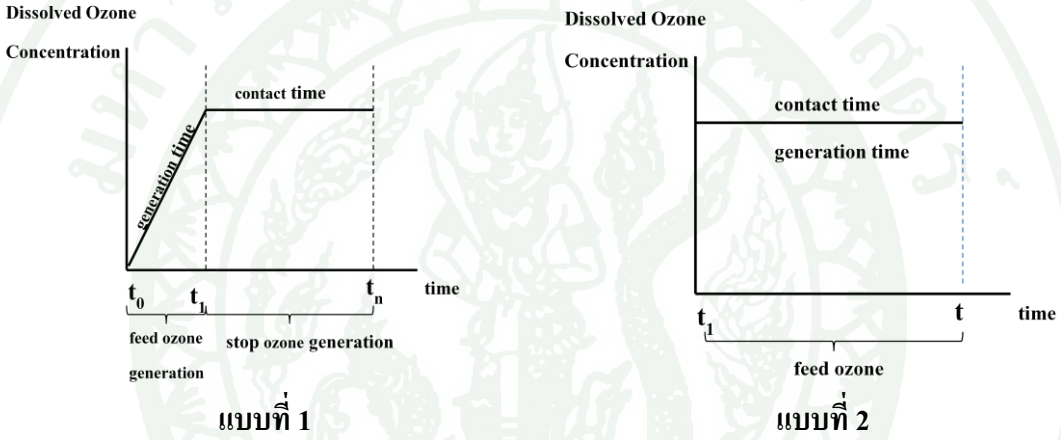
ในการทดลองระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test) ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ปริมาตร 1 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยา ทำการเติมโอโซน ที่มีอัตราการผลิตโอโซนที่ได้จากการทดลองที่ 4 และทำการติดตั้งระบบโอโซเนชันตามหัวข้อที่ 3.1

6.1 การศึกษาอิทธิพลของค่าความเข้มข้น ของโอโซนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Ozone Concentration) และระยะเวลาสัมผัส (contact time) ต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ ในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ (batch)

การศึกษาอิทธิพลของ ค่าความเข้มข้น ของโอโซน ที่ละลายในน้ำ (Dissolved Ozone Concentration) และระยะเวลาสัมผัส (contact time) ต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ ในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ ทำการทดลองโดยเตรียมน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์สังเคราะห์แปรค่าความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10, 25 และ 50 mg/L ปริมาตร1 ลิตรลงในถังปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำและระยะเวลาสัมผัส โอโซนในช่วงค่าไม่เกินค่าความเข้ม ข้นของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปาจากการทดลองที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษา อิทธิพลของ ระยะเวลาสัมผัสโอโซนประกอบด้วย ค่าระยะเวลาสัมผัสเริ่มต้น (generation time) และระยะเวลาสัมผัส (contact time) จากภาพที่ 26 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำเทียบกับระยะเวลาเดินระบบ โดยในภาพแบบที่ 1 เป็นการทดลอง โดยเติมโอโซนละลายน้ำลงไปในระยะเวลา t_0 ถึง t_1 เรียกว่า ค่าระยะเวลาสัมผัสเริ่มต้น (generation time) จากนั้นจะปิดเครื่องกำเนิดโอโ ซน และทำการปั่นกวนผสม ที่ระยะเวลาต่าง ๆ (t_n) เรียกว่า ค่าระยะเวลาสัมผัส (contact time) ขณะที่ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองในแบบที่ 2 โดยเมื่อทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (continuous test) ในสภาวะที่เหมาะสม ค่าระยะเวลาสัมผัสเริ่มต้น (generation time) จะเท่ากับค่าระยะเวลาสัมผัสโอโซน (contact time) ที่เวลา t_1 ถึง t



ภาพที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำและระยะเวลาเดินระบบ

ขั้นตอนการวิเคราะห์

6.1.1 จัดเตรียมระบบการทดลองดังภาพที่ 20 และ 21

6.1.2 เติมน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ ที่ค่าความเข้มข้นที่ 10 mg/L ปริมาตร 1 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ (batch)

6.1.3 เติมโอโซนลงในน้ำตัวอย่าง ที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ และระยะเวลาสัมผัสในช่วงค่าไม่เกินค่าความเข้มข้นโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำจากการทดลองที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.1.4 นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนแล้วไปตรวจวัด Acetaldehyde, COD และ BOD_5/COD เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ รายละเอียดของพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ทางเคมี แสดงดังตารางที่ 12

6.1.5 ทำการทดลองซ้ำ ข้อที่ 6.1 ถึง 6.4 โดยแปรค่าความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 25 และ 50 mg/L

ตารางที่ 12 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	Standard method no.
BOD (mg/L)	5-day BOD test	5210 B
COD (mg/L)	Closed reflux, Titration method	5220 C
Acetaldehyde (mg/L)	Spectroscopy	*

หมายเหตุ * การวิเคราะห์หา Acetaldehyde (mg/L) อ้างอิงตาม IUPAC (1979)
ที่มา: APHA (2005)

7. การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) โดยนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองเดินระบบโอโซนแบบแบตช์ในหัวข้อที่ 6 มาใช้ในการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง ปริมาตรน้ำเสียในถังปฏิกิริยา 1 ลิตร ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

7.1 จัดเตรียมระบบการทดลองดังภาพที่ 22 และ 23

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.2 เตรียมน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์สังเคราะห์ในถังพักน้ำปริมาตร 10 ลิตร จากนั้นใส่น้ำเสียลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 1 ลิตร

7.3 ติดตั้งปั๊มและต่อเครื่องกำเนิดโอโซน

7.4 สูบน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์สังเคราะห์จากถังพักน้ำเข้าสู่ถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลที่ทำให้ระดับน้ำในถังปฏิกิริยาอยู่ที่ 1 ลิตร โดยเลือกระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 6

7.5 เติมโอโซนลงในน้ำตัวอย่างในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างก่อนเข้ากระบวนการโอโซเนชันและหลังกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง

7.6 นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการเติมโอโซนแล้วไปตรวจวัด Acetaldehyde, BOD_5/ COD, COD และ Organic acid ตามตารางที่ 13 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซเนชัน

ตารางที่ 13 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างหลังผ่านโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	Standard method no.
BOD (mg/L)	5-day BOD test	5210 B
COD (mg/L)	Closed reflux, Titration method	5220 C
Organic acid	HPLC	Inertsil ODS-EP
Acetaldehyde (mg/L)	Spectroscopy	*

หมายเหตุ * การวิเคราะห์หา Acetaldehyde (mg/L) อ้างอิงตาม IUPAC (1979)
ที่มา: APHA (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

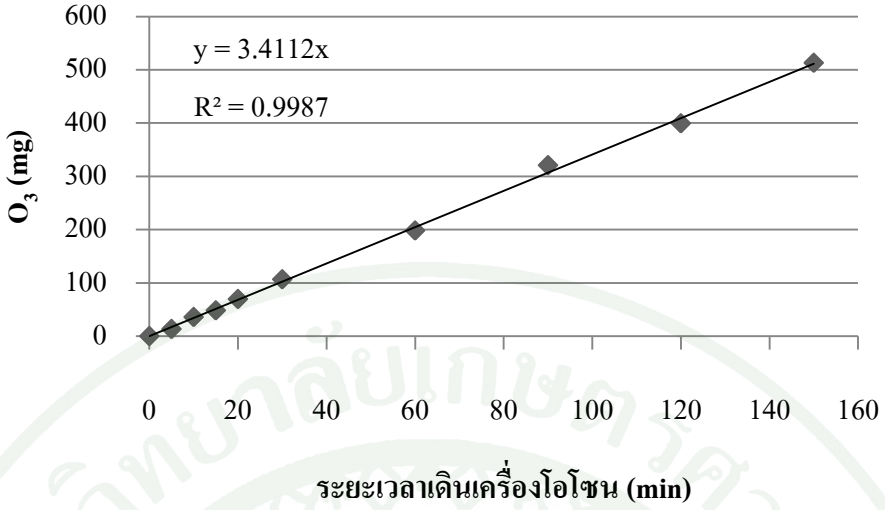
1. ผลการศึกษาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone Generator)

การศึกษาอัตราการผลิตโอโซน ของเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T เพื่อหาปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ที่ระยะเวลาเดินเครื่องโอโซน ต่าง ๆ กัน ด้วยวิธี Iodometric method โดยผ่านก๊าซโอโซนที่ผลิตได้เข้าสู่ขวดดักก๊าซโอโซน ที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2% (KI 2%) พบว่าปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา เดินเครื่องโอโซน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเดินเครื่องโอโซนเพิ่มขึ้น แสดงดังตาราง ที่ 14 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการ ทดลองมาพล็อตกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าปริมาณโอโซน ที่ผลิตได้เทียบกับ ระยะเวลาเดินเครื่องโอโซนจะได้กราฟมาตรฐานดังภาพที่ 27

ตารางที่ 14 อัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T

ระยะเวลาเดินเครื่องโอโซน(min)	ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ (O_3) (mg)				SD	อัตราการผลิตโอโซน(mg/hr)
	การทดลอง			ค่าเฉลี่ย (mg)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	13.62	12.67	13.86	13.38	0.70	160.56
10	35.61	36.21	35.73	35.85	0.34	215.10
15	49.47	48.16	47.20	48.28	1.10	193.12
20	69.67	68.95	70.02	69.55	0.63	208.65
30	104.32	107.71	107.83	106.62	1.15	213.24
60	196.68	199.01	199.01	198.23	1.18	198.23
90	321.68	318.98	321.92	320.86	1.63	213.91
120	398.39	401.82	398.26	399.49	1.90	199.75
150	512.87	513.49	513.00	513.12	0.34	205.25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 ปริมาณโอโซน (mg) ที่ผลิตได้เทียบกับระยะเวลาเดินเครื่องโอโซน (min)

จากภาพที่ 27 พบว่า ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดโอโซนในงานวิจัยนี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวลา โดยเมื่อพล็อตกราฟ แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณโอโซนที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับ ระยะเวลาเดินเครื่องโอโซน พบว่าอัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 204.67 mg/hr ที่อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบคงที่ 3.5 L/min คิดเป็นปริมาณโอโซนต่ออากาศ 0.97 mg/L ในงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการผลิตโอโซนที่ผลิตได้จริงมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพที่เครื่องระบุ คือ ที่ 1 g/hr เนื่องจาก ในการทดลอง ใช้อากาศแห้ง (Dry air) เป็นวัตถุดิบซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ 20.95% (Alsheyab *et al*., 2007) จึงส่งผลให้อัตราการผลิตโอโซนมีค่าต่ำกว่าที่เครื่องระบุ นอกจากการนี้การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Pure oxygen) แทนอากาศแห้งจะสามารถผลิตโอโซนได้เพิ่มสูงขึ้นจาก 1-3% เป็น 2-6% โดยน้ำหนัก (Metcalf and Eddy, 2004.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

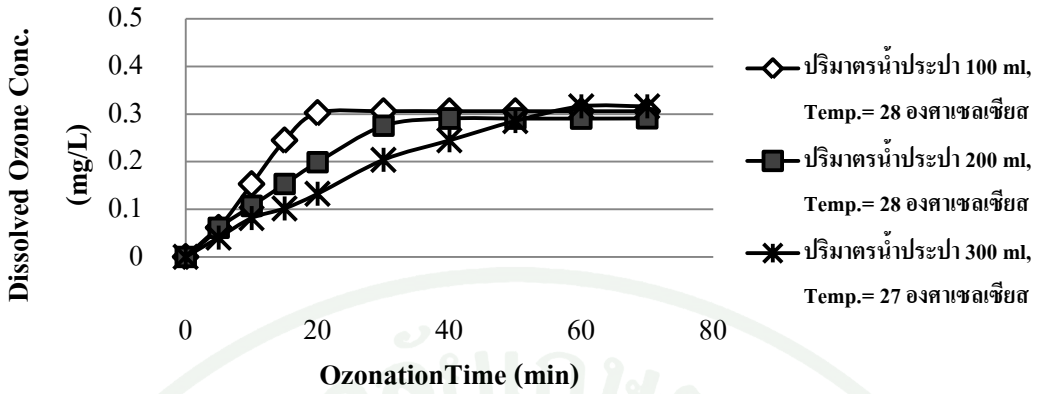
2. ผลการศึกษาปริมาณโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปา

การศึกษาปริมาณโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปาของเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T ที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/min ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2% (KI 2%) ในการดักจับโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปาที่ระยะเวลาสัมผัสโอโซนต่าง ๆ กัน ในการทดลองทำการเดินระบบโดยป้อนก๊าซโอโซนผ่านลงไปในน้ำประปา ที่ปริมาตร 100, 200 และ 300 มิลลิลิตร ตามลำดับ พบว่าค่าความเข้มข้นของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปาเท่ากับ 0.306, 0.291 และ 0.316 mg/L ตามลำดับ ที่ระยะเวลาอิ่มตัว 20, 40 และ 60 นาที ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 0.304 mg/L ดังตารางที่ 15 และเมื่อนำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโอโซน ที่ละลายในน้ำเทียบกับระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ปริมาตรน้ำประปาต่าง ๆ กันจะได้กราฟดังภาพที่ 28

ตารางที่ 15 ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำประปาที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

ระยะเวลาสัมผัสโอโซน (นาที)	ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำ (Dissolved ozone concentration, mg/L)		
	ปริมาตรน้ำประปา 100 ml (28 °C)	ปริมาตรน้ำประปา 200 ml (28 °C)	ปริมาตรน้ำประปา 300 ml (27 °C)
0	0.000	0.000	0.000
5	0.061	0.061	0.041
10	0.153	0.107	0.082
15	0.245	0.153	0.102
20	0.306	0.199	0.133
30	0.306	0.275	0.204
40	0.306	0.291	0.245
50	0.306	0.291	0.286
60	0.306	0.291	0.316
70	0.306	0.291	0.316

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



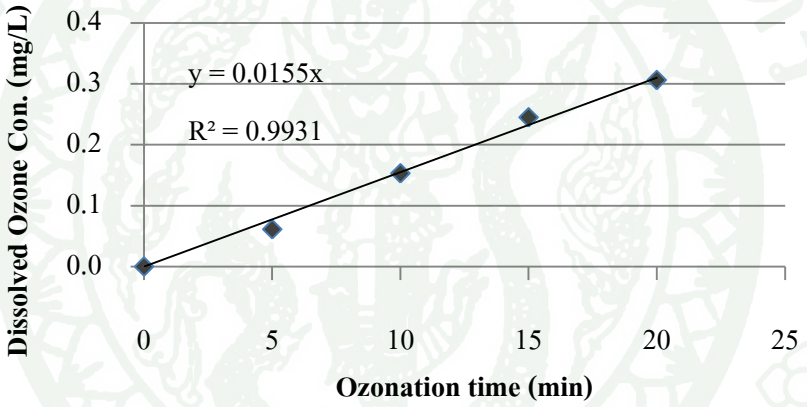
ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโอโซนที่ละลายในน้ำเทียบกับระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ปริมาตรน้ำประปาต่าง ๆ กัน ที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/mim

จากภาพที่ 28 เมื่อนำค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำเทียบกับระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ปริมาตรน้ำประปา 100, 200 และ 300 ml พบว่าระยะเวลาอิ่มตัวของโอโซนเท่ากับ 20, 40 และ 60 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ ปริมาตรน้ำประปาต่างกันจะส่งผลต่อระยะเวลา ถึงจุดอิ่มตัวของโอโซนในน้ำ โดยระยะเวลาถึงจุดอิ่มตัวของโอโซนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริม าตรน้ำประปาเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่ มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนขึ้นกับปริมาตรน้ำประปา ระยะเวลาสัมผัส และอุณหภูมิของน้ำ โดยที่อุณหภูมิต่ำความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนจะเกิดได้ดี (วีระพงศ์, 2548) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเข้าของอากาศซึ่งจะส่งผลต่อความเข้มข้นของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ

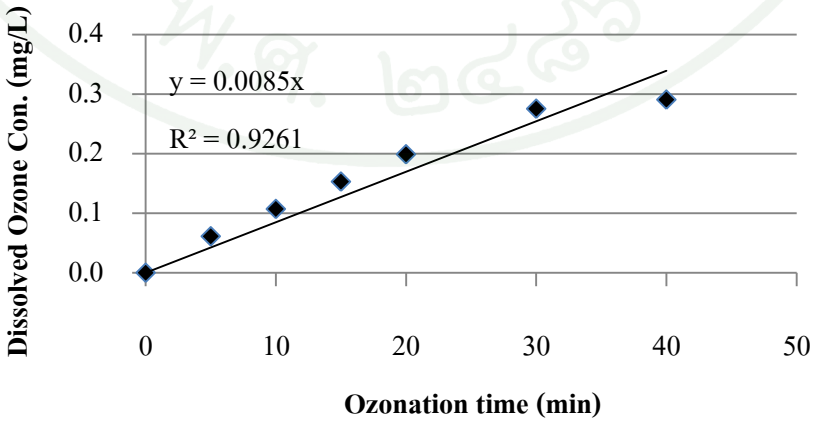
ในการทดลองนี้ได้ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำเฉลี่ย 0.30 mg/L โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน อิ่มตัวทางทฤษฎีแสดงดังตารางที่ 5 (บทที่ 2) ที่ความเข้มข้นโอโซน (Ozone concentration) 3%w/w ที่อุณหภูมิน้ำ 25 °C ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำเท่ากับ 10.58 mg/L (Ozone solution, 2010) ซึ่งจากผลการทดลองเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T มีค่าปริมาณโอโซนต่ออากาศ 0.97 mg/L เทียบเท่าปริมาณก๊าซโอโซน 0.97 g/m^3 ความเข้มข้นโอโซน (Ozone concentration) ในอากาศ 0.08 %w/w คิดเป็นค่าการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวทางทฤษฎีเท่ากับ 0.28 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 25°C จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม ค่าความเข้มข้นโอโซน (Ozone concentration) และอุณหภูมิของน้ำ ขณะที่ค่าออกซิเจนที่อิ่มตัวในน้ำ (DO saturation) จะมีค่าคงที่ 7.6 mg/L ที่อุณหภูมิ 30°C โดยขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำเพียงค่าเดียว ขณะที่ปริมาณอากาศที่เติมลงไปในน้ำจะมีค่าออกซิเจนคงที่ 20.95%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ค่าการละลายน้ำของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปา (ตารางที่ 15) มาพล็อตกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำประปาเทียบกับระยะเวลาสัมผัสโอโซน (ช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาอิ่มตัวของโอโซนละลายน้ำ) ที่ปริมาตรน้ำประปา 100, 200 และ 300 ml ตามลำดับ พบว่า ที่ปริมาตรน้ำประปา 100 ml ระยะเวลาสัมผัส 0 ถึง 20 นาที แสดงดังภาพที่ 29 ที่ปริมาตรน้ำประปา 200 ml ระยะเวลาสัมผัส 0 ถึง 40 นาที แสดงดังภาพที่ 30 และที่ปริมาตรน้ำประปา 300 ml ระยะเวลาสัมผัส 0 ถึง 60 นาที แสดงดังภาพที่ 31 อัตราส่วนค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำประปาต่อระยะเวลาสัมผัสโอโซน เท่ากับ 0.015, 0.008 และ 0.005 ตามลำดับ โดยจะนำค่าอัตราส่วนดังกล่าวไปใช้คำนวณหาระยะเวลาสัมผัสโอโซน (contact time) ที่ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำต่าง ๆ เพื่อศึกษา ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในสภาวะแบบแบตช์ในหัวข้อถัดไป

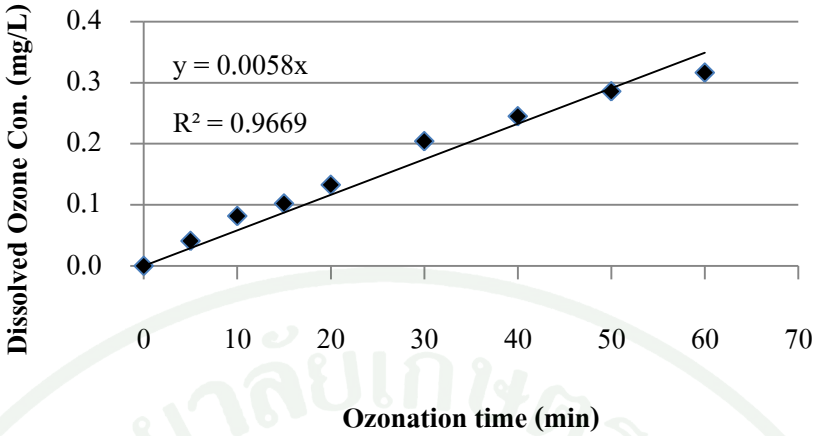


ภาพที่ 29 กราฟมาตรฐานของโอโซนละลายน้ำที่ปริมาตรน้ำประปา 100 ml



ภาพที่ 30 กราฟมาตรฐานของโอโซนละลายน้ำที่ปริมาตรน้ำประปา 200 ml

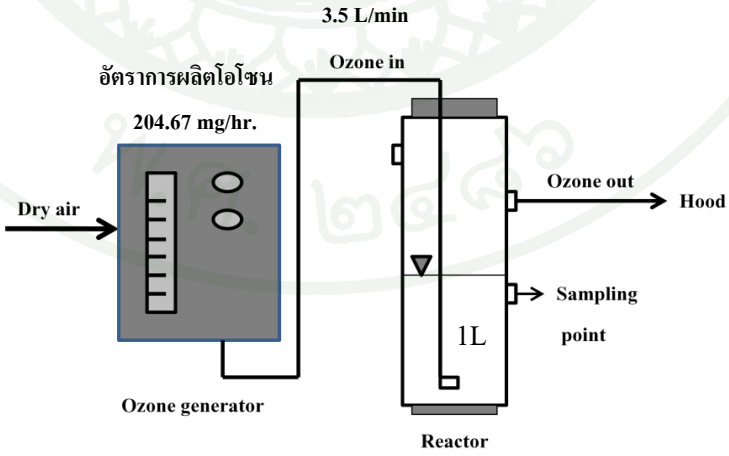
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 31 กราฟมาตรฐานของโอโซนละลายน้ำที่ปริมาตรน้ำประปา 300 ml

3. ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในสภาวะแบบแบตช์ (Batch test)

ในการทดลองระบบโอโซเนชัน แบบแบตช์ (Batch test) ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ปริมาตร 1 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยา ทำการเติมโอโซน ที่มีอัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 204.67 mg/hr. ที่อัตราการไหลเข้าของอากาศคงที่ 3.5 L/min โดยก๊าซโอโซนจะผ่านเข้าสู่ถังปฏิกิริยาผ่านหัวกระจาย ก๊าซ (Gas diffuser) ที่อยู่บริเวณด้านล่างถัง และสัมผัสกับน้ำเสีย ทำให้เกิดการปั่นป่วนภายในถัง ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แสดงแผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1 ผลการศึกษาอิทธิพล ของความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำ (Dissolved Ozone Concentration) และระยะเวลาสัมผัส (contact time) ต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์ (Batch test)

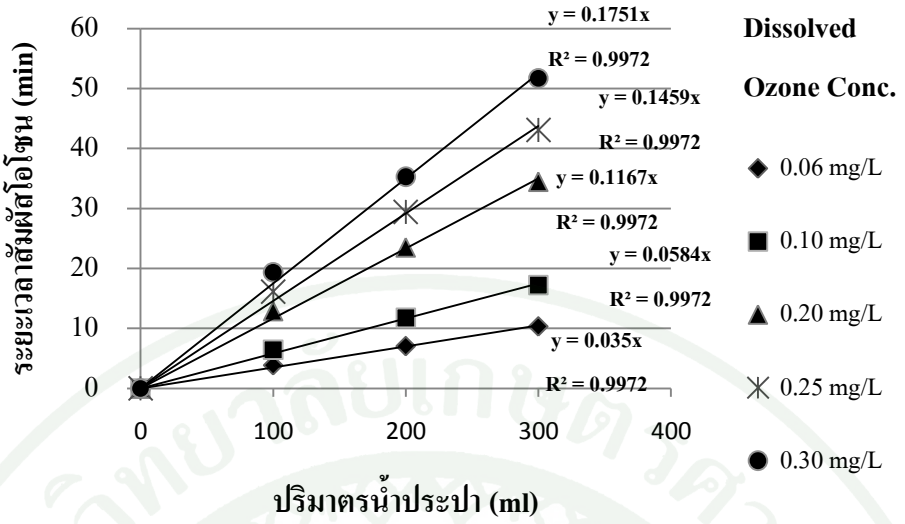
ในการทดลองทำการเติมโอโซนที่มีอัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 204.67 mg/hr. อัตราการไหลเข้าของอากาศคงที่ 3.5 L/min. ลงในน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ปริมาตร 1 ลิตร ศึกษาที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์เริ่มต้น 10, 25 และ 50 mg/L โดยเลือกใช้ค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำที่ 0.06, 0.10, 0.20, 0.25 และ0.30 mg/L (ไม่เกินค่าอิ่มตัวของโอโซนที่ละลายในน้ำที่ 0.304 mg/L) ที่ปริมาตรน้ำประปา 1 ลิตร โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรก หาระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำที่ 0.06, 0.10, 0.20, 0.25 และ0.30 mg/L ของปริมาตรน้ำประปา 100, 200 และ 300 ml จากการคำนวณอัตราส่วนค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำประปาต่อระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ได้จาก การทดลองข้อ 2 ดังตารางที่ 16 จากนั้นนำค่าที่ได้พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัม ผัสเทียบกับปริมาตรน้ำประปา 100, 200 และ 300 ml ดังภาพที่ 33

ตารางที่ 16 ค่าระยะเวลาสัมผัสโอโซนเทียบกับปริมาตรน้ำประปาที่ค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำต่าง ๆ

ปริมาตรน้ำประปา (ml)	**ระยะเวลาสัมผัสโอโซน (min)**				
	ค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ (Dissolved Ozone Conc., mg/L)				
	0.06	**0.10**	**0.20**	**0.25**	**0.30**
100	3.87	6.45	12.90	16.13	19.35
200	7.06	11.76	23.53	29.41	35.29
300	10.34	17.24	34.48	43.10	51.72

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 33 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสโอโซนเทียบกับปริมาตรน้ำประปาที่ค่าโอโซนละลายน้ำ 0.06, 0.10, 0.20, 0.25 และ 0.30 mg/L

ขั้นที่สอง หาระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0.06, 0.10, 0.20, 0.25 และ0.30 mg/L ที่ปริมาตรน้ำประปา 1 ลิตร จากการคำนวณอัตราส่วนระยะเวลาสัมผัสโอโซนต่อปริมาตรน้ำประปาที่ได้จากกราฟตามภาพที่ 33 แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำและระยะเวลาสัมผัสของกระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในสภาวะแบบแบตช์ (batch) ที่ใช้ในการทดลอง

Run No.	V net	Dissolved Ozone	Contact time	
	(L)	Concentration (mg/L)	(min)	(hr.)
T-0	1	0.00	0	0.00
T-1	1	0.06	35	0.58
T-2	1	0.10	58	0.97
T-3	1	0.20	117	1.94
T-4	1	0.25	146	2.43
T-5	1	0.30	175	2.92

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลของค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลาย ในน้ำและระยะเวลาสัมผัสโอโซน ต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน ศึกษาที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10, 25 และ 50 mg/L ตามลำดับ ทดลองที่ความเข้มข้นของโอโซน ที่ละลายน้ำในช่วง 0 - 0.3 mg/L ระยะเวลาสัมผัสอยู่ในช่วง 0 ถึง 4 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 18 และภาพที่ 34

ตารางที่ 18 ผลของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์ ที่ปริมาตรน้ำเสีย 1 L อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min

Acetaldehyde (mg/L)	Feed O_3 (mg)	Dissolved Ozone Conc. (mg/L)	Contact time (hr.)	Acetaldehyde ที่เหลืออยู่เฉลี่ย (mg/L)	% Removal
10	0.00	0.00	0.00	9.33	0.00
	119.39	0.06	0.58	5.26	43.62
	199.21	0.10	0.97	4.01	57.02
	398.09	0.20	1.94	2.46	73.63
	497.69	0.25	2.43	2.06	77.92
	597.30	0.30	2.92	1.90	79.64
	699.64	0.30	3.42	1.81	80.60
	801.97	0.30	3.92	1.84	80.28
25	0.00	0.00	0.00	25.24	0.00
	119.39	0.06	0.58	16.78	33.52
	199.21	0.10	0.97	13.86	45.09
	398.09	0.20	1.94	10.53	58.28
	497.69	0.25	2.43	9.21	63.51
	597.30	0.30	2.92	8.98	64.42
	699.64	0.30	3.42	8.85	64.94
	801.97	0.30	3.92	8.82	65.06

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 (ต่อ)

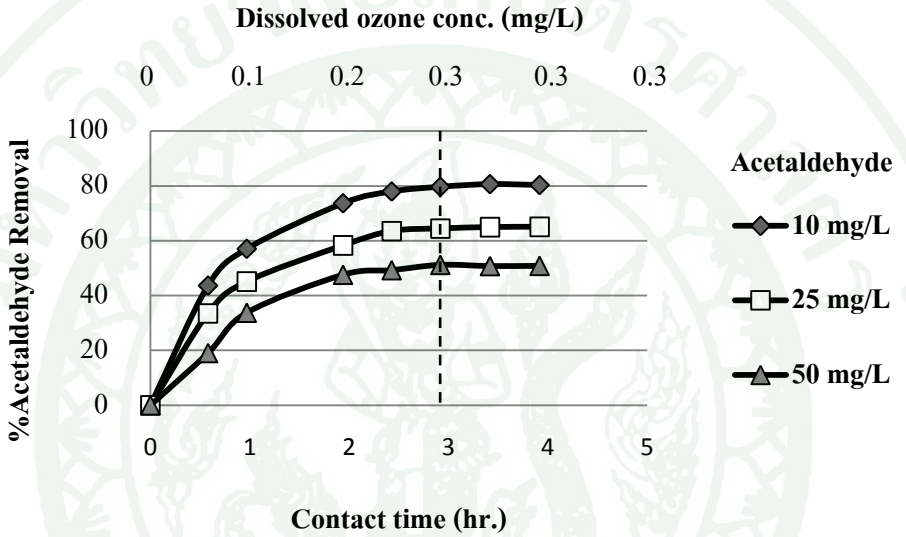
Acetaldehyde (mg/L)	Feed O_3 (mg)	Dissolved Ozone Conc. (mg/L)	Contact time (hr)	Acetaldehyde ที่เหลืออยู่เฉลี่ย (mg/L)	% Removal
50	0.00	0.00	0.00	50.36	0.00
	119.39	0.06	0.58	40.76	19.06
	199.21	0.10	0.97	33.35	33.78
	398.09	0.20	1.94	26.38	47.62
	497.69	0.25	2.43	25.54	49.29
	597.30	0.30	2.92	24.56	51.23
	699.64	0.30	3.42	24.78	50.79
	801.97	0.30	3.92	24.74	50.87

จากตารางที่ 18 เมื่อเปรียบเทียบอะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 25 และ 50 mg/L กับค่าความเข้มข้นโอโซนที่ละลายในน้ำ พบว่าอะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันในทุกความเข้มข้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ โอโซนที่ละลายในน้ำเท่ากับ 0.3 mg/L สามารถกำจัดอะซิตัลดีไฮด์ได้สูงที่สุด และต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของ โอโซนที่ละลายในน้ำลดลง แสดงให้เห็นว่า การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ขึ้นกับความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำ โดยทุกความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์จะเริ่มคงที่ที่ระยะ เวลาสัมผัส โอโซน 2.92 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L มีอะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่เมื่อผ่านกระบวนการโอโซเนชัน อยู่ในช่วง 1.81-1.90 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 79.64-80.28% ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 25 mg/L มีปริมาณอะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่เมื่อผ่านกระบวนการโอโซเนชัน อยู่ในช่วง 8.82-8.98mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 64.42-65.06% และที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 50 mg/L มีอะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่เมื่อผ่านกระบวนการโอโซเนชัน อยู่ในช่วง 24.56-24.78 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 50.87-51.23% ดังภาพที่ 34

นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำกับระยะเวลาสัมผัสโอโซน พบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสโอโซนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำเพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณโอโซนในระบบจะเข้าทำปฏิกิริยา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กับอะซิตัลดีไฮ ด์ในน้ำเสียแต่เมื่อถึงจุดอิ่มตัวของโอโซนที่ 0.3 mg/L ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำจะมีค่าคงที่ โอโซนที่เหลือจะเกิดการระเหยออกจากระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียมีค่าคงที่ แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณโอโซนและระยะเวลาสัมผัสโอโซน ประสิทธิภาพกา รกำจัดจะไม่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 34 ในการทดลองจึงทำการศึกษาที่ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำโดยให้อยู่ในช่วงค่าที่ไม่เกินค่าการอิ่มตัวของโอโซน เพื่อลดการสูญเสียโอโซนและประหยัดค่าใช้จ่ายการบำบัด



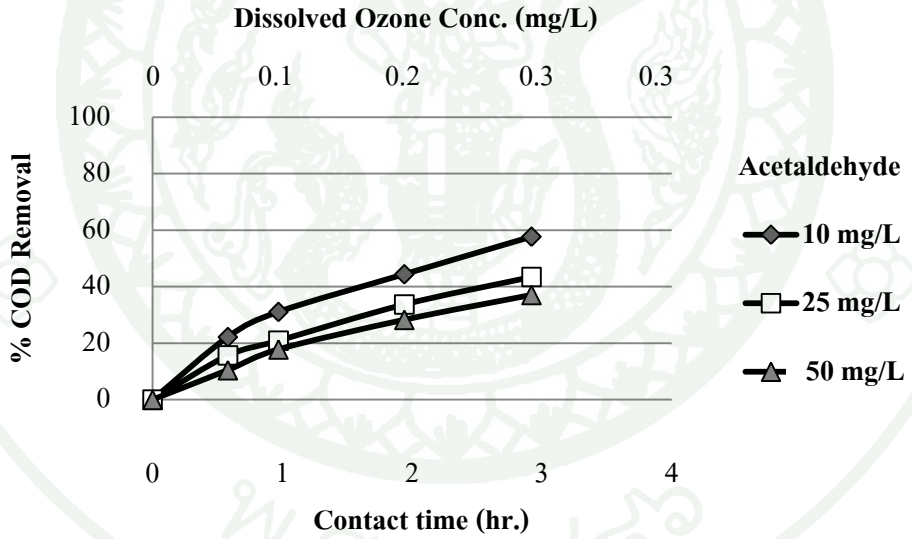
ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบแบตช์ (batch) ที่ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำและระยะเวลาสัมผัสค่าต่าง ๆ ที่อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L และอัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/mim

จากภาพที่ 34 พบว่า ที่ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำ 0.3 mg/L เวลาสัมผัส 2.92 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์ ที่ความเข้มข้น 10, 25 และ 50 mg/L เท่ากับ 79.64%, 64.42% และ51.23% ตามลำดับ และประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในระบบจะคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัสประมาณ 3 ชั่วโมงในทุกความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการ กำจัดอะซิตัลดีไฮด์กับระยะเวลา สัมผัสโอโซน (contact time) ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่า ประสิทธิภาพการ กำจัด อะซิตัลดีไฮด์มีแนวโน้ม สูงขึ้น เมื่อ เพิ่ม ระยะเวลา สัมผัส โอโซน สอดคล้องกันใน ที่ทุกความเข้มข้น ของอะซิตัลดีไฮด์ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วยโอโซน และการทำปฏิกิริยาของโอโซนเป็นแบบต่อเนื่องโดยจะแปรผันตามระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน (ภาณุมาศ, 2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD

การศึกษาผลของการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 25 และ 50 mg/L ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน แสดงดัง ภาพที่ 35 พบว่าสารอินทรีย์ในทุกความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์มีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดแปรผันตามระยะเวลาสัมผัส (ปริมาณโอโซน และ ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลาย ในน้ำ) โดยกระบวนการ โอโซเนชันสามารถกำจัด COD ได้มากสุด ที่ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L ที่ระยะเวลาสัมผัส 2.92 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโอโซน ละลายน้ำ 0.3 mg/L ซึ่งสามารถลดปริมาณ COD จาก 29.31 mg/L เหลือ 12.38 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด 57.76% ในขณะที่ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ 25 mg/L สามารถลดปริมาณ COD จาก 74.91 mg/L เหลือ 42.34 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัด COD คิดเป็น 43.48 % และ ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ 50 mg/L สามารถลดปริมาณ COD จาก 124.42 mg/L เหลือ 78.31 mg/L คิดเป็น 37.06 mg/L



ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำต่าง ๆ ที่อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L และอัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/mim

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

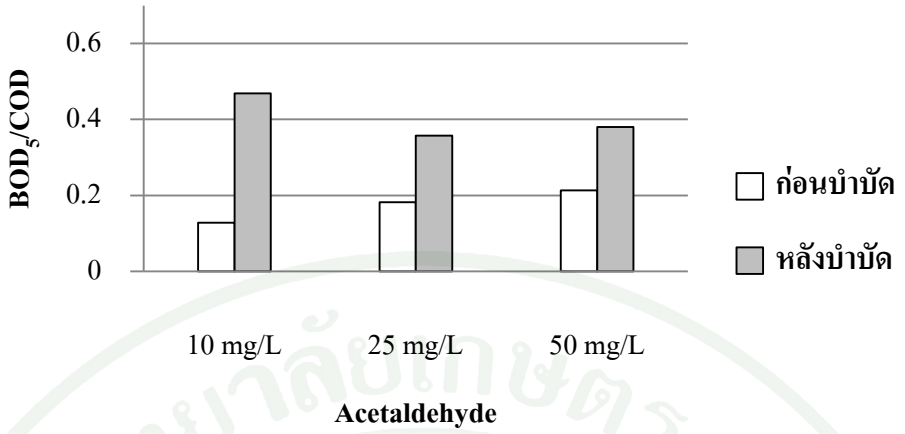
3.3 ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อการย่อยสลายอะซิตัลดีไฮด์

อัตราส่วนของ BOD_5/COD ของน้ำเสียสังเคราะห์สามารถบ่งบอกความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ของสารอินทรีย์ ในน้ำเสียนั้นได้ โดยอัตราส่วน BOD_5/COD ที่สูง บ่งชี้ถึงความสามารถในการ ย่อยสลายทางชีวภาพที่สูงขึ้น (Lu *et al*., 2009.) จากการศึกษาผลของกระบวนก ารโอโซเนชันต่อความสามารถในการ ย่อยสลายทางชีวภาพ โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ความเข้มข้น เริ่มต้น 10, 25 และ 50 mg/L มาผ่านกระบวนการโอโซเนชันที่ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำที่ 0 mg/L และ 0.3 mg/L ที่ระยะเวลาสัมผัส 0 และ 3 ชั่วโมง ได้ผลดังตารางที่ 19 และภาพที่ 36

ตารางที่ 19 แสดงค่าอัตราส่วน BOD_5/COD ก่อนและหลังบำบัดด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ต่าง ๆ

Acetaldehyde (mg/L)	**Dissolved ozone concentration (mg/L)**	**ทดลอง**	**BOD_5 (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**BOD_5/COD**
10 mg/L	0.00	ก่อนบำบัด	4.50	35.21	0.1278
	0.30	หลังบำบัด	5.50	11.74	0.4685
25 mg/L	0.00	ก่อนบำบัด	13.25	72.73	0.1822
	0.30	หลังบำบัด	14.75	41.28	0.3573
50 mg/L	0.00	ก่อนบำบัด	26.50	124.26	0.2133
	0.30	หลังบำบัด	29.50	77.66	0.3798

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



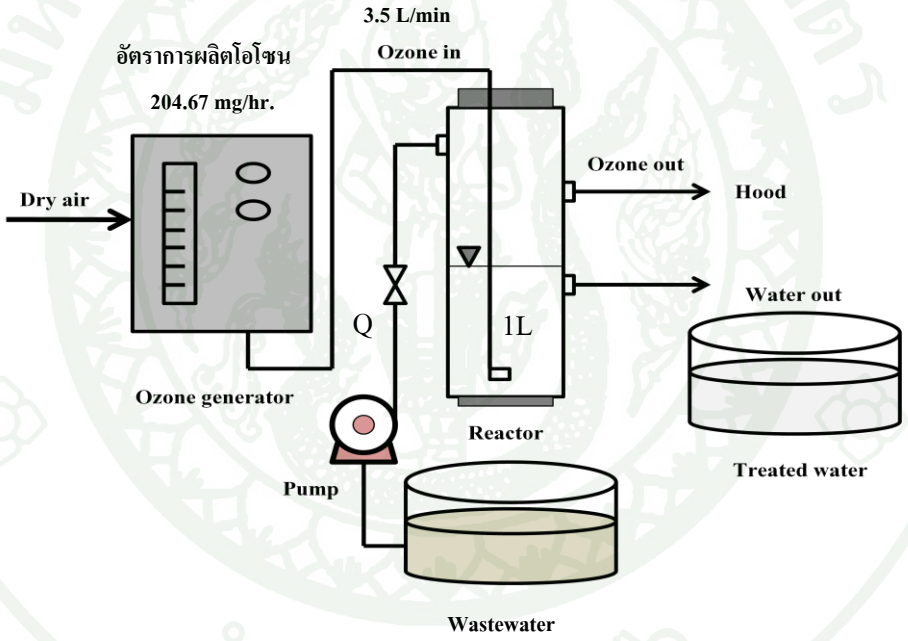
ภาพที่ 36 อัตราส่วนBOD_5/COD ที่อะซิตัลดีไฮด์ก่อนและหลังบำบัดด้วยโอโซน ที่ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0 และ 0.3 mg/L

จากตารางที่ 19 และภาพที่ 36 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน พบว่า ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L น้ำเสียก่อนบำบัดมีค่า BOD_5 4.50 mg/L มีค่า COD 35.21 mg/L และน้ำเสียหลังบำบัดมีค่า BOD_5 5.50 mg/L มีค่า COD 11.74 mg/L อัตราส่วน BOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.1278 เป็น 0.4685 ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 25 mg/L น้ำเสียก่อนการบำบัดมีค่าBOD_5 13.25 mg/L มีค่า COD 72.73 mg/L และน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าBOD_5 14.75 mg/L มีค่า COD 41.28 mg/L อัตราส่วน BOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.1822 เป็น 0.3573 และที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 50 mg/Lน้ำเสียก่อนการบำบัดมีค่า BOD_5 26.50 mg/L มีค่า COD 124.26 mg/L และน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่า BOD_5 29.50 mg/L มีค่า COD 77.66 mg/L อัตราส่วน BOD_5/COD จะเพิ่มขึ้นจาก 0.2133 เป็น 0.3798 โดยจะเห็นว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่า BOD_5/COD เพิ่มขึ้นในทุกความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์ แสดงให้เห็นว่าโอโซเนชันมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ ซึ่งโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น และเหมาะ สมในการบำบัดทางชีวภาพต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซเนชันเมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสม ในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง (continuous)

การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) ดังภาพที่ 37 ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ในถังพักน้ำเสียปริมาตร 10 ลิตร จากนั้นใส่น้ำเสียลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 1 ลิตร ทำการต่อปั๊มและเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีอัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 204.67 mg/hr. อัตราการไหลเข้าของอากาศคงที่ 3.5 L/min โดยให้น้ำเสียผ่านปั๊มเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่อัตราการไหลที่ทำให้ระดับน้ำเสียในถัง งปฏิกิริยาคงที่ 1 ลิตร โดยคำนวณจากระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองโอโซเนชันในสภาวะแบบแบตช์ (batch) จากข้อ 3



ภาพที่ 37 แสดงแผนภูมิติดตั้งระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลอง ในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ (batch) จากข้อ 3 มาใช้ในการเดินระบบถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง (continuous) โดยเลือกความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ที่ 10 mg/L เนื่องจากเครื่องกำเนิดโอโซนที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดโอโซนขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้น 10 mg/L จึงให้ผลการบำบัดที่ดีที่สุด โดยอัตราการผลิตโอโซน เท่ากับ 204.67 mg/hr. อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/min ปริมาณโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ 0.304 mg/L ปริมาตรน้ำเสียในถังปฏิกิริยา 1 ลิตร ระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่เหมาะสมในหัวข้อที่ 3 ในการทดลองนี้เลือกระยะเวลาสัมผัสที่ 0.58, 0.97, 1.95 และ2.92 ชั่วโมง สำหรับความเข้มข้นของโอโซนที่ละลาย ในน้ำ 0.06, 0.10, 0.20 และ 0.30 mg/L ตามลำดับ มาใช้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อ งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์และหาสัดส่วนอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดต่อปริมาณโอโซน โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง แสดงดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous)

Run No.	**Air flow (L/min)**	**อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)**	**โอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ (mg/L)**	**V net (L)**	**Q (ml/min)**	**θ=V/Q**	
						(min)	**(hr)**
C-1	3.5	204.67	0.304	1	29	35	0.58
C-2	3.5	204.67	0.304	1	17	58	0.97
C-3	3.5	204.67	0.304	1	8.57	117	1.95
C-4	3.5	204.67	0.304	1	5.71	175	2.92

หมายเหตุ Air flow = อัตราการไหลของอากาศ (L/min)

V net = ปริมาตรน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์ในถังปฏิกิริยา (L)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์ (L/min)

θ = ระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์ (min)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดลองที่ Run C-1 อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L อัตราการไหลอากาศคงที่ 3.5 L/min ที่ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 0.58 ชั่วโมง (35 นาที) อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา 29 ml/min ระดับน้ำในถังปฏิกิริยา 1 ลิตร ทำการเดินระบบ โอโซนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 21

เมื่อทำการ เดินระบบโอโซเนชัน แบบต่อเนื่อง (continuous) ดังภาพที่ 38 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบโอโซเนชันความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์จะมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ (เวลาสัมผัส 0.58-2.08 ชั่วโมง) สามารถบำบัดอะซิตัลดีไฮด์จากความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย 9.79 mg/L เหลืออยู่ในช่วง 6.07-6.66 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพ การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วย กระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องเฉลี่ย 31.97-38% ดังภาพที่ 39 โดยในช่วงแรกของการเดินระบบประสิทธิภาพในการ บำบัดอะซิตัลดีไฮด์จะมีค่าต่ำ เนื่องจากน้ำเสียสัมผัสกับโอโซนเป็นระยะเวลาไม่นานก็จะออกจากระบบ และมีแนวโน้มสูง ขึ้นเมื่อระยะเวลาเดินระบบโอโซนเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัด เริ่มคงที่หลังจากระยะเวลาเดินระบบผ่านไป 1 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า ทุกครั้งที่เริ่มต้นทำการเดินระบบจะต้อง ใช้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้น้ำเสียสัมผัสกับโอโซนจนกระทั่งถึงระยะเวาสัมผัสที่เหมาะสม จึงจะได้ประสิทธิภาพตามต้องการ โดยผลจากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับ ประสิทธิภาพของกระบวนการ โอโซเนชันแบบแบตช์คือ 43.62% แสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในถังป ฏิกิริยาแบบแบตช์สามารถนำมาปรับใช้กับการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 21 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 0.58 hr.

Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	0.58	0.00	0.00	7.42	9.94	9.53	9.89	9.79	0.00
			19.78	0.10	7.68	9.09	9.11	9.02	9.07	7.35
			39.91	0.20	7.66	8.12	8.26	8.37	8.25	15.73
			79.48	0.39	7.54	7.18	7.27	7.34	7.26	25.84
			119.39	0.58	7.48	6.58	6.63	6.78	6.66	31.97
			221.73	1.08	7.32	6.02	6.24	6.34	6.20	36.67
			324.06	1.58	7.38	6.00	6.13	6.18	6.10	37.69
			426.40	2.08	7.32	6.09	6.04	6.09	6.07	38.00

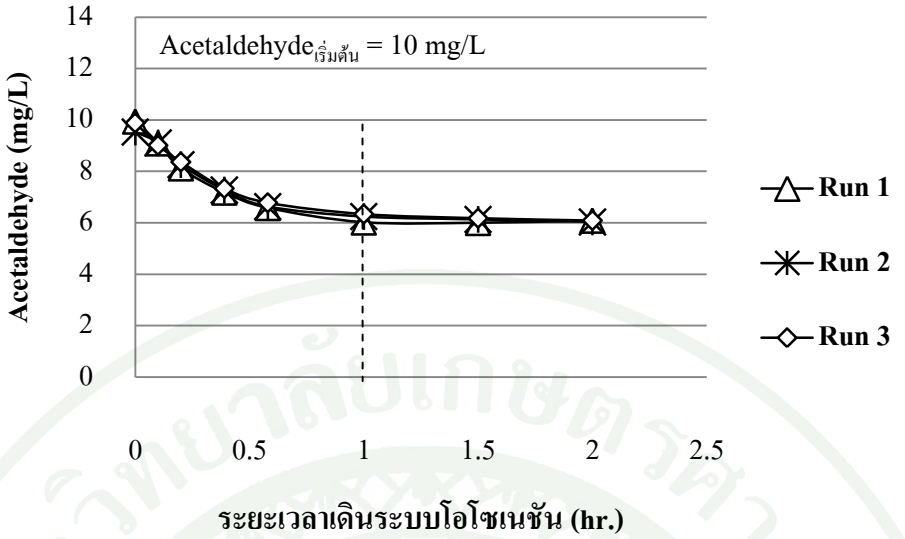
หมายเหตุ อัตราการไหลอากาศคงที่ 3.5 L/min, อัตราการไหลของน้ำเสีย 29 ml/min

Contact time = ระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสียในถังปฏิกิริยา

Feed O_3 = ปริมาณโอโซน (mg) ที่ใส่ลงในน้ำเสีย

Run time = ระยะเวลาเดินระบบโอโซเนชัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 38 อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการ โอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 2 ชั่วโมง ที่ Contact time 0.58 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min



ภาพที่ 39 ประสิทธิภาพในการ บำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 2 ชั่วโมง ที่ Contact time 0.58 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดลองที่ Run C-2 อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L อัตราการไหลอากาศคงที่ 3.5 L/min ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.97 ชัวโมง (58 นาที) อัตราการไหลของ น้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา 17 ml/min ระดับน้ำในถังปฏิกิริยา 1 ลิตร ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 22

เมื่อทำการ เดินระบบโอโซเนชัน แบบต่อเนื่อง (continuous) ดังภาพที่ 40 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบโอโซเนชันความเข้มข้น ของอะซิตัลดีไฮด์มีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ (เวลาสัมผัส 0.97-2.97 ชั่วโมง) สามารถบำบัดอะซิตัลดีไฮด์จากความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย 9.67 mg/L เหลืออยู่ในช่วง 4.74-5.58 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพ การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วย กระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องเฉลี่ย 42.30-50.98% ดังภาพที่ 41 แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะเวลาเดินระบบ 0-0.97ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการ บำบัดอะซิตัลดีไฮด์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเดินระบบโอโซนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาเดินระบบโอโซน 0.97 ชั่วโมง โดย ในช่วงแรกน้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีระยะเวลาสัม ผัสต่ำกว่า 0.97 ชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าไม่สูงมาก เนื่องจากน้ำเสียมีระยะ เวลาสัมผัสโอโซนในถังปฏิกิริยา ได้ไม่นาน โดยผลจากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับ ประสิทธิภาพของกระบวนกา รโอโซเนชันในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์คือ 57.02% แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์สามารถนำมาปรับใช้กับการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องได้

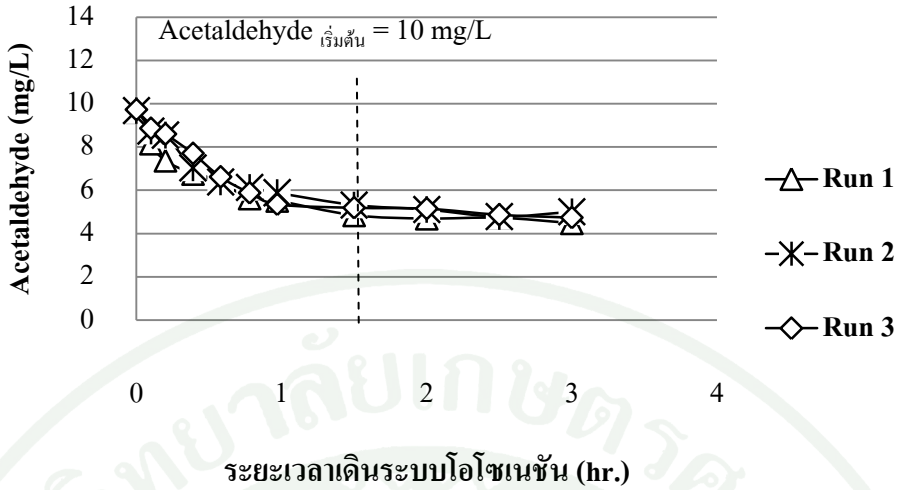
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 22 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 0.97 hr

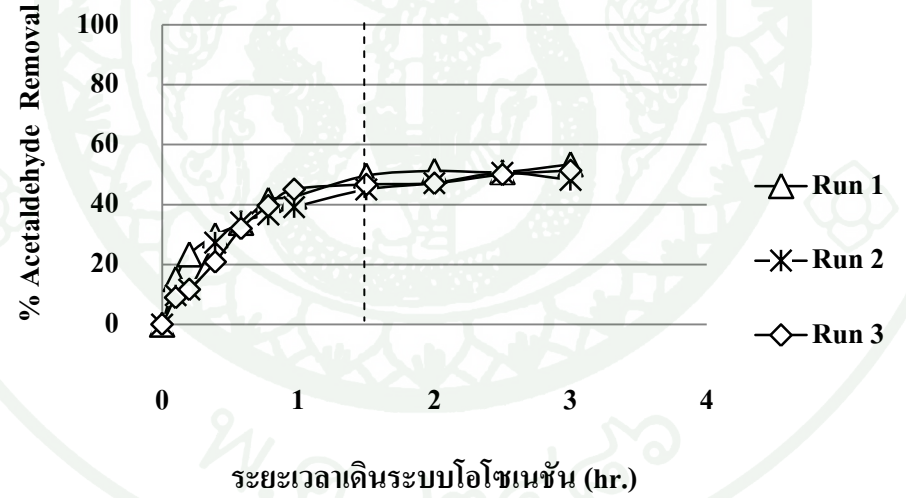
Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	0.97	0.00	0.00	7.76	9.62	9.68	9.73	9.67	0.00
			19.78	0.10	8.13	8.16	8.74	8.86	8.59	11.17
			39.91	0.20	8.21	7.37	8.55	8.60	8.17	15.51
			79.48	0.39	8.14	6.75	7.04	7.70	7.16	25.96
			119.39	0.58	7.89	6.35	6.38	6.62	6.45	33.30
			159.30	0.78	7.74	5.62	6.13	5.88	5.88	39.19
			199.21	0.97	7.62	5.51	5.89	5.35	5.58	42.30
			301.55	1.47	7.66	4.84	5.32	5.19	5.12	47.05
			403.87	1.97	7.65	4.69	5.11	5.15	4.98	48.50
			506.22	2.47	7.60	4.72	4.78	4.87	4.79	50.47
			608.56	2.97	7.62	4.48	5.01	4.73	4.74	50.98

หมายเหตุ อัตราการไหลอากาศ 3.5 L/min, อัตราการไหลของน้ำเสีย 17 ml/min, Contact time = ระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสีย
Run time = ระยะเวลาเดินระบบโอโซเนชัน, Feed O_3 = ปริมาณโอโซน (mg) ที่ใส่ลงในน้ำเสีย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 40 อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 3 ชั่วโมง ที่ Contact time 0.97 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min



ภาพที่ 41 ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 3 ชั่วโมง ที่ Contact time 0.97 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดลองที่ Run C-3 อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L อัตราการไหลอากาศคงที่ 3.5 L/min ที่ระยะเวลาสัมผัส 1.95 ชั่วโมง อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา 8.57 ml/min ระดับน้ำในถังปฏิกิริยา 1 ลิตร ค่าโอโซนละลายน้ำเทียบจากระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 0.20 mg/L ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 23

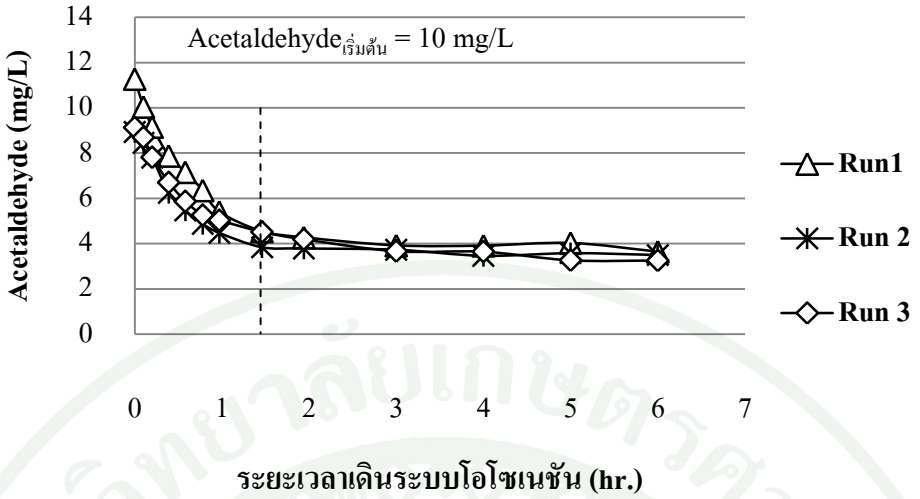
เมื่อทำการเดินระบบโอโซเนชัน แบบต่อเนื่อง (continuous) ดังภาพที่ 42 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบโอโซเนชันความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์จะมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ (เวลาสัมผัส 1.95-5.95 ชั่วโมง) สามารถบำบัดอะซิตัลดีไฮด์จากความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย 9.78 mg/L เหลืออยู่ในช่วง 3.37-4.09 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องเฉลี่ย 58.18-65.54% ดังภาพที่ 43 แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะเวลาเดินระบบ 0-1.95 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเดินระบบโอโซนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาเดินระบบโอโซน 1.95 ชั่วโมง โดยในช่วงแรกน้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีระยะเวลาสัมผัสต่ำกว่า 1.95 ชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าไม่สูงมาก เนื่องจากน้ำเสียมีระยะเวลาสัมผัสโอโซนในถังปฏิกิริยาต่ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

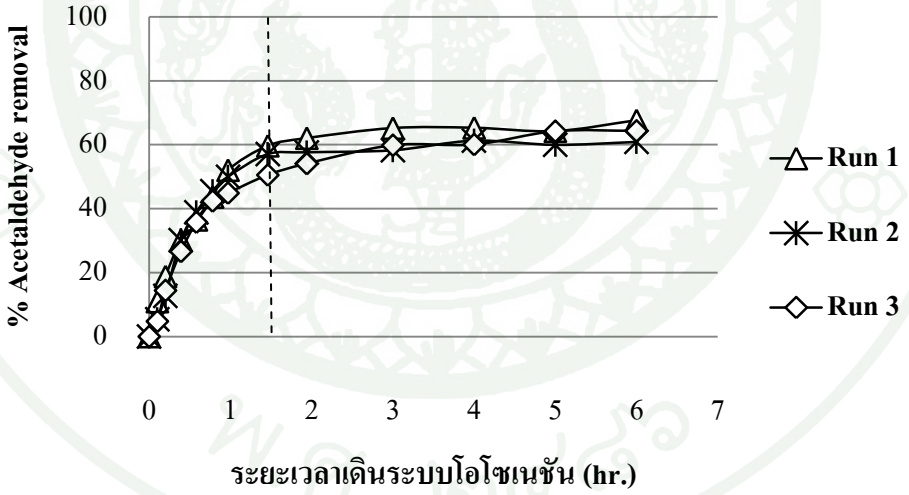
ตารางที่ 23 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 1.94 hr.

Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	1.95	0.00	0.00	7.88	11.27	8.94	9.14	9.78	0.00
			19.78	0.10	8.18	10.04	8.46	8.70	9.06	7.36
			39.91	0.20	8.02	9.15	7.80	7.82	8.26	15.54
			79.48	0.39	8.12	7.87	6.24	6.71	6.94	29.04
			119.39	0.58	8.00	7.15	5.46	5.87	6.16	37.01
			159.30	0.78	8.04	6.35	4.87	5.27	5.50	43.76
			199.21	0.98	8.14	5.40	4.47	5.04	4.97	49.18
			298.48	1.47	8.04	4.54	3.84	4.52	4.30	56.03
			398.09	1.95	7.82	4.27	3.79	4.20	4.09	58.18
			602.76	2.95	7.78	3.92	3.73	3.67	3.77	61.45
			807.43	3.95	7.76	3.91	3.46	3.65	3.67	62.47
			1,012.10	4.95	7.77	4.03	3.58	3.27	3.63	62.88
			1,216.78	5.95	7.75	3.65	3.30	3.16	3.37	65.54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 42 อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 6 ชั่วโมง Contact time 1.95 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ. 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min



ภาพที่ 43 ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องในระยะเวลาเดินระบบ 6 ชั่วโมง ที่ Contact time 1.95 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ. 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดลองที่ Run C-4 อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L อัตราการไหลอากาศคงที่ 3.5 L/min ที่ ระยะเวลาสัมผัส 2.92 ชั่วโมง อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา 5.71 ml/min ระดับน้ำในถังปฏิกิริยา 1 ลิตร ค่าโอโซนละลายน้ำเทียบจากระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 0.30 mg/L ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 24

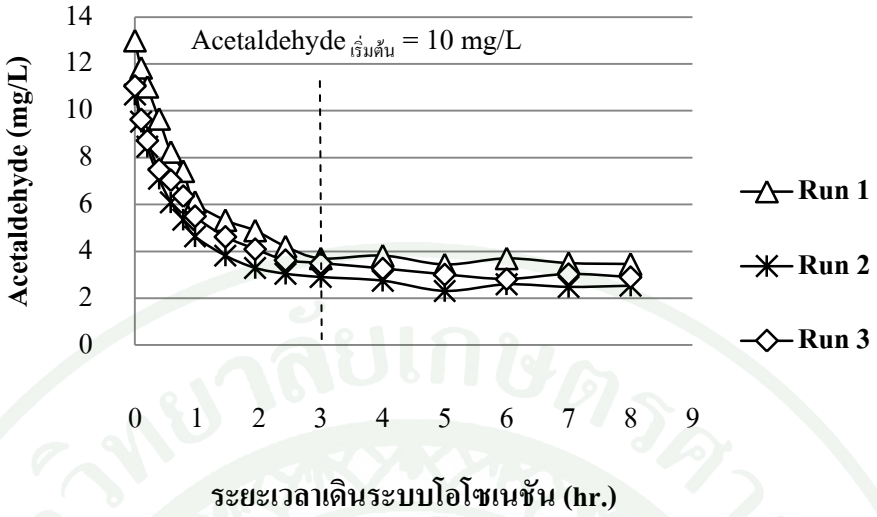
เมื่อทำการ เดินระบบโอโซเนชัน แบบต่อเนื่อง (continuous) ดังภาพที่ 44 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบโอโซเนชันความเข้มข้น ของอะซิตัลดีไฮด์จะมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ (เวลาสัมผัส 2.92-7.92 ชั่วโมง) สามารถบำบัดอะซิตัลดีไฮด์จากความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย 11.58 mg/L เหลืออยู่ในช่วง 2.96-3.36 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพ การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วย กระบวนการ โอโซเนชั นแบบต่อเนื่องเฉลี่ย 70.98-74.44% ดังภาพที่ 45 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงระยะเวลาเดินระบบ 0-2.92 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการ บำบัดอะซิตัลดีไฮด์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเดินระบบโอโซนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาเดินระบบโอโซน 2.92 ชั่วโมง โดยในช่วงแรกน้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีระยะเวลาสัมผัสต่ำกว่า 2.92 ชั่วโมง ทำให้น้ำเสียสัมผัสกับโอโซนเป็นระยะเวลาไม่นานก็จะไหลออกจากระบบ แต่เมื่อน้ำเสียสัมผัสกับโอโซนที่ระยะเวลาที่เหมาะสม 2.92 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้น และระบบจะเริ่มคงที่ ซึ่งผลจากการทดลอง มีใกล้เคียงกับ ประสิทธิภาพของกระบวนกา รโอโซเนชันในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ คือ 80.28% สามารถนำมาปรับใช้กับการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

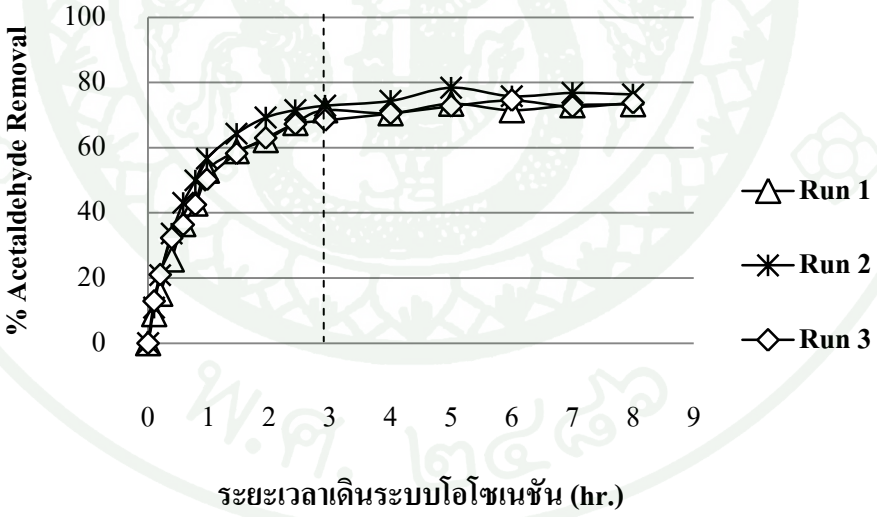
ตารางที่ 24 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องที่ Contact time 2.92 hr.อัตราการไหลอากาศ 3.5 L/min

Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	2.92	0.00	0.00	7.42	12.99	10.70	11.06	11.58	0.00
			19.78	0.10	7.78	11.83	9.53	9.63	10.33	10.79
			39.91	0.20	7.76	11.02	8.47	8.73	9.41	18.74
			79.48	0.39	7.77	9.65	7.10	7.49	8.08	30.22
			119.39	0.58	7.80	8.24	6.09	7.04	7.12	38.51
			159.30	0.78	7.72	7.42	5.35	6.36	6.38	44.91
			199.21	0.97	7.68	6.11	4.64	5.50	5.42	53.20
			298.48	1.46	7.52	5.33	3.82	4.62	4.59	60.36
			398.09	1.94	7.45	4.89	3.29	4.10	4.09	64.68
			497.69	2.43	7.39	4.21	3.04	3.63	3.63	68.65
			597.30	2.92	7.38	3.70	2.90	3.49	3.36	70.98
			801.97	3.92	7.36	3.82	2.74	3.27	3.28	71.68
			1,006.65	4.92	7.37	3.44	2.31	3.01	2.92	74.78
			1,211.32	5.92	7.34	3.70	2.59	2.82	3.04	73.75
			1,415.99	6.92	7.33	3.50	2.48	3.03	3.00	74.09
			1,620.66	7.92	7.31	3.46	2.53	2.90	2.96	74.44

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 44 อะซิตัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง ในระยะเวลาเดินระบบ 8 ชั่วโมง ที่ Contact time 2.92 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ. 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min



ภาพที่ 45 ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง ในระยะเวลาเดินระบบ 8 ชั่วโมง ที่ Contact time 2.92 hr. อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ. 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 25 สัดส่วนอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดต่อปริมาณโอโซนที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์เริ่มต้น 10 mg/L

Run No.	Air flow (L/min)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)	โอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ (mg/L)	V net (L)	Q (ml/min)	θ (hr)	Feed O_3 (mg)	Feed O_3 (mg/L)	C_0	C_e	C_0-C_e	η	Acetaldehyde ที่ถูกกำจัด/ mg O_3
C-1	3.5	204.67	0.304	1	29	0.58	119.39	119.39	9.79	6.66	3.13	31.97	0.026
C-2	3.5	204.67	0.304	1	17	0.97	199.21	199.21	9.67	5.58	4.09	42.30	0.021
C-3	3.5	204.67	0.304	1	8.57	1.95	398.09	398.09	9.78	4.09	5.69	58.18	0.014
C-4	3.5	204.67	0.304	1	5.71	2.92	597.30	597.30	11.58	3.36	8.22	70.98	0.014

หมายเหตุ Air flow = อัตราการไหลของอากาศ (L/min)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์ (L/min)

θ = ระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์ (min)

Feed O_3 = ปริมาณโอโซน (mg) ที่ใส่ลงในน้ำเสีย 1 ลิตร

C_0 = ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์เริ่มต้นเฉลี่ย (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านโอโซนเฉลี่ย (mg/L)

C_0 - C_e = ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัด (mg/L)

η = ประสิทธิภาพการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์ (%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากผลการทดลองเดินระบบโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L อัตราการไหลอากาศคงที่ 3.5 L/min ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L ปริมาตรน้ำเสีย 1L ทำการทดลองโดยเลือกที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 0.58, 0.97, 1.95 และ2.92 ชั่วโมง พบว่าเมื่อทำการเดินระบบโอโซเนชันจนถึงระยะเวลาที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในระบบคงที่ สามารถนำค่าปริมาณโอโซนที่เติ มลงในน้ำเสียและปริมาณ อะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดมาหาสัดส่วนอะซิตัลดีไฮด์ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อปริมาณโอโซน สัดส่วนของอะซิตัลดีไฮด์ต่อปริมาณโอโซน เท่ากับ 0.026, 0.021, 0.014 และ 0.014 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 25

5. ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อการย่อยสลายอะซิตัลดีไฮด์ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

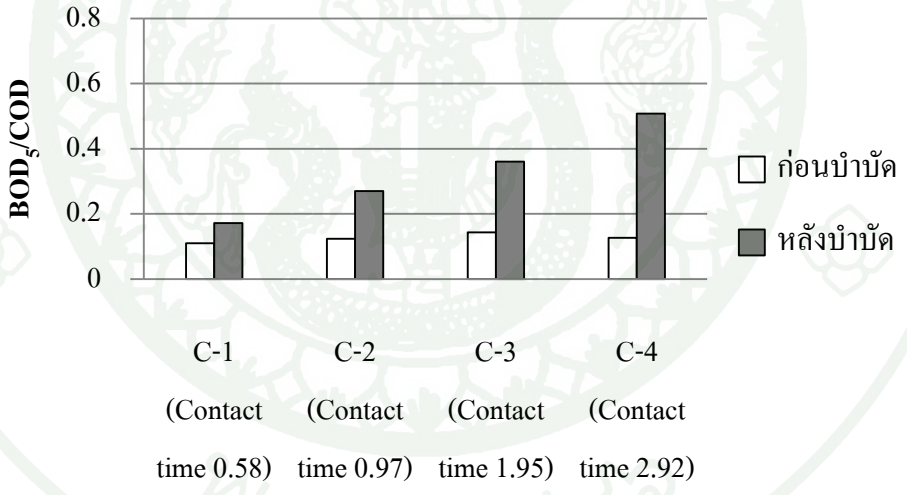
ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องโดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ผลของกระบวนการโอโซเนชันต่อการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. Air flow 3.5 L/min

RUN No.	ระยะเวลาสัมผัส (θ) (hr.)	พารามิเตอร์	หน่วย	ก่อนการทดลอง	หลังผ่านโอโซน	% การกำจัด
C-1	0.58	Acetaldehyde	(mg/L)	9.79	6.07	38.00
		COD	(mg/L)	31.84	26.27	17.49
		BOD_5/COD		0.1099	0.1713	35.84
C-2	0.97	Acetaldehyde	(mg/L)	9.67	4.74	50.98
		COD	(mg/L)	28.22	18.55	34.27
		BOD_5/COD		0.1240	0.2695	53.99
C-3	1.95	Acetaldehyde	(mg/L)	9.78	3.37	65.54
		COD	(mg/L)	34.95	19.42	44.43
		BOD_5/COD		0.1431	0.3604	60.29
C-4	2.92	Acetaldehyde	(mg/L)	11.58	2.96	74.44
		COD	(mg/L)	27.58	11.82	57.14
		BOD_5/COD		0.1269	0.5076	75.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากตารางที่ 26 ผลการศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันในระบบแบบต่อเนื่องในสภาวะที่เหมาะสม พบว่า ที่ Run C-1 ระยะเวลาสัมผัส 0.58 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 38% ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 17.49% ค่าBOD_5/COD มีค่าเพิ่มขึ้น 35.84% ที่ Run C-2 ระยะเวลาสัมผัส 0.97 ชั่วโมง ประสิทธิภาพ การกำจัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 50.98% ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 34.27% ค่าBOD_5/COD มีค่าเพิ่มขึ้น 53.99% ที่ Run C-3 ระยะเวลาสัมผัส 1.95 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 65.54% ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 44.43% ค่าBOD_5/COD มีค่าเพิ่มขึ้น 60.29% ที่ Run C-4 ระยะเวลาสัมผัส 2.92 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 74.44% ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 57.14% ค่าBOD_5/COD มีค่าเพิ่มขึ้น 75% ดังภาพที่ 45 อัตราส่วน BOD_5/COD ที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ โอโซเนชันมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการ ย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ และเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย และเหมาะสมต่อการบำบัดทางชีวภาพต่อไป ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 อัตราส่วนBOD_5/COD ที่อะซิตัลดีไฮด์ก่อนและหลังบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่องที่Run C-1 ถึง Run C-4 อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/hr. ค่าโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ 0.304 mg/L Air flow 3.5 L/min

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ผลของการหาสารผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโอโซเนชัน

ผลของกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L อัตราการไหลอากาศคงที่ 3.5 L/min ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 2.92 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดอะซิตัลดีไฮด์ได้สูงสุด 74.44% และลดค่า COD ได้สูงสุด 57.14% จะเห็นได้ว่ากระบวนการโอโซเนชันให้ผลการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ได้ดี แต่สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูป COD ยังคงมีอยู่ในน้ำเสีย แสดงให้เห็นว่าอะซิตัลดีไฮด์ ที่ถูกกำจัดไป ยังคงมีอยู่ในระบบ โดยที่บางส่วนเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ (complete oxidation) เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และและน้ำ และอีกส่วนหนึ่ง ไม่เกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ แต่เปลี่ยนรูปไปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนและ สารประกอบหมู่อัลดีไฮด์ จะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์กลุ่มกรดอินทรีย์ (organic acid) ต่าง ๆ ส่วนใหญ่ที่เกิดเป็นสารประกอบหมู่ carboxylic acid ได้แก่ acetic acid และ formic acid เป็นต้น (Glaze *et al.*, 1991) และ (Faungnawakij *et al.*,2004)

จากผลการทดลองขั้นต้น จึงนำน้ำตัวอย่างอะซิตัลดีไฮด์ความเข้มข้น 10 mg/L ที่ก่อนและหลังกระบวนการโอโซเนชัน แบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาสัมผัส โอโซน 2.92 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์หาสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) โดยใช้ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) แสดงในตารางที่ 27 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ได้แก่ กรดฟอร์มิก (Formic acid) และพบว่าไม่มีปริมาณกรดแอซีติก (acetic acid) เกิดขึ้น จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการ ย่อยสลายอะซิตัลดีไฮด์เกิดขึ้น ไม่สมบูรณ์ ยังมีอะซิตัลดีไฮด์เหลืออยู่ในระบบ และผลของปฏิกิริยาทำให้อะซิตัลดีไฮด์ส่วนหนึ่งเปลี่ยนรูปเป็นกรดอินทรีย์ได้

ตารางที่ 27 ผลของสารผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโอโซเนชัน

Product	**สูตรโมเลกุล**	**ความเข้มข้นสารผลิตภัณฑ์ (mg/L)**	
		ก่อนบำบัดโอโซเนชัน	**หลังบำบัดโอโซเนชัน**
Acetaldehyde	CH_3COH	/	/
Formic acid	HCOOH	X	/
Acetic acid	CH_3COOH	X	X

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากการทดสอบเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T มีอัตราการผลิต โอโซน 204.67 mg/hr. ที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/min คิดเป็นปริมาณโอโซนต่ออากาศ 0.97 mg/L

2. จากการศึกษาปริมาณโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปาของเครื่องกำเนิดโอโซน OZZON รุ่น OZ-6501T มีอัตราการผลิต โอโซน 204.67 mg/hr. อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/min ปริมาณโอโซนต่ออากาศ 0.97 mgO_3/L ทำการทดลองที่ปริมาตร 100, 200 และ 300 ml มีค่าความเข้มข้นของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำเท่ากับ 0.306, 0.291 และ 0.316 mg/L ตามลำดับ ที่ระยะเวลาอิ่มตัว 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ คิดเป็น โอโซนที่อิ่มตัวในน้ำเฉลี่ย 0.304 mg/L ที่อุณหภูมิน้ำ 28 °C ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำขึ้นกับ อัตราการไหลเข้าของอากาศ ปริมาตรน้ำประปา ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิของน้ำ และค่าการอิ่มตัวของโอโซนในน้ำ

3. การศึกษากระบวนการโอโซเนชันสภาวะแบบแบตช์ (Batch test) ทำการทดลองโดยเติมโอโซนที่อัตราการผลิต โอโซน 204.67 mg/hr. อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/min ปริมาณโอโซนอิ่มตัวในน้ำเท่ากับ 0.304 mg/L ในน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ปริมาตร 1 ลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 25 และ50 mg/L โดยทดลองที่ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.3 mg/L ระยะเวลาสัมผัส 0 ถึง 2.92 ชั่วโมง พบว่า ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำ 0.3 mg/L สามารถบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ได้ ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10, 25 และ 50 mg/L ระยะเวลาสัมผัส 2.92 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 79.64%, 64.42% และ 51.23% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เท่ากับ 57.76%, 43.48 % และ 37.06 mg/L จากการวิเคราะห์ BOD_5/COD ของน้ำเสีย โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ความเข้มข้น 10, 25 และ 50 mg/L มาผ่านกระบวนการโอโซเนชันที่ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำ ที่ 0 mg/L และ 0.3 mg/L ที่ระยะเวลาสัมผัส 0 และ2.92 ชั่วโมง อัตราส่วน BOD_5/COD ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L เพิ่มขึ้นจาก 0.1278 เป็น 0.4685 ที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 25 mg/L เพิ่มขึ้นจาก 0.1822 เป็น 0.3573 และที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ 50 mg/L อัตราส่วน BOD_5/COD จะเพิ่มขึ้นจาก 0.2133 เป็น 0.3798 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโอโซเนชันมี ผลต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (Continuous test) ทำการทดลองโดยเติมโอโซนที่ อัตราการผลิต โอโซน 204.67 mg/hr. อัตราการไหลของอากาศคงที่ 3.5 L/min ปริมาณโอโซนอิ่มตัวในน้ำเท่ากับ 0.304 mg/L ทำการทดลองใน น้ำเสียสังเคราะห์อะซิตัลดีไฮด์ความเข้มข้น 10 mg/L ด้วยอัตราการไหลที่ทำให้ระดับน้ำในถังปฏิกิริยาคงที่ 1 ลิตร ทำการทดลอง ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.58, 0.97, 1.95 และ 2.92 ชั่วโมง จากการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส 0.58 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 37.98% ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี 21.20% ค่าBOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.1099 เป็น 0.1713 ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.97 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 50.99% ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 34.27% ค่าBOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.1240 เป็น 0.2695 ที่ระยะเวลาสัมผัส 1.95 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 65.57% ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี 44.43% ค่าBOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.1431 เป็น 0.3604 ที่ระยะเวลาสัมผัส 2.92 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์เท่ากับ 74.44% ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี 57.14% ค่าBOD_5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.1269 เป็น 0.5076 สัดส่วนอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดต่อปริมาณโอโซนที่ระยะเวลาสัมผัส 0.58, 0.97, 1.95 และ 2.92 ชั่วโมง เท่ากับ 0.026, 0.021, 0.014 และ0.014 ตามลำดับ และเมื่อนำน้ำเสียที่ระยะเวลาสัม ผัส 2.92 ชั่วโมง ไป วิเคราะห์ หาสารผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่าปริมาณอะซิตัลดีไฮด์บางส่วน เกิดการย่อยสลายไม่สมบูรณ์ เปลี่ยนรูปไปเป็นกรดอินทรีย์คือ Formic acid ซึ่งพบในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด โอโซน แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ โอโซเนชันทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยเปลี่ยน สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ย่อยสลายได้ง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ง่ายขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งอะซิตัลดีไฮด์เกิดขึ้นจากการแตกตัวของไวนิลอะซิเตตมอนอเมอร์ (VAM) ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียจริงที่มีไวนิลอะซิเตตมอนอเมอร์ (VAM) ตกค้างอยู่ตั้งแต่ต้นทาง เพื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของน้ำเสียสังเคราะห์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริง

2. ศึกษาการบำบัด อะซิตัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับรังสียูวี (UV) หรือไฮโดรเจนเปอออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งอาจจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้สูงขึ้นได้

3. การเติมโอโซน (feed O_3) ในการทดลองโอโซเนชันแบบต่อเนื่องได้คำนวณค่าโอโซนที่เติมลงในน้ำเสีย (feed O_3) จากอัตราการ ผลิตโอโซน ไม่ได้ทำการตรวจวัด ปริมาณโอโซนในถังปฏิกิริยาซึ่งผู้ทำการวิจัยต่อควรทำการตรวจวัดค่าดังกล่าวด้วย

4. ในการเดินระบบโอโซเนชัน อะซิตัลดีไฮด์ที่อยู่ในน้ำเสียบางส่วนอาจเกิดการระเหยออกจากระบบไปได้ เนื่องจาก อะซิตัลดีไฮด์ มีค่าHenry's constant เท่ากับ 7.89 x 10^{-5} atm-m^3/mol จัดเป็นสาร อินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ย วกับการบำบัด อะซิตัลดีไฮด์ร่วมกับโอโซนที่อยู่ในสถานะแก๊สที่เหลือจากการบำบัดในน้ำเสีย เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำมาใช้ออกแบบระบบบำบัดต่อไป

5. ในการเดินระบบโอโ ซนจะมีก๊าซโอโซนส่วนหนึ่งที่เหลือจากการบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ในน้ำเสีย ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำก๊าซโอโซนที่ระเหยออกนอกระบบกลับมาใช้ใหม่ในระบบการบำบัดอีกครั้ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2554. **ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง**. แหล่งที่มา: http://www.diw.go.th/hawk/default.php, 27 ธันวาคม 2555.

Ozone Solution, 2010. **ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ.** แหล่งที่มา: http://www.ozoneapplications.com/info/ozone_properties.htm, 5 มกราคม 2556

Ozone Solution, 2012. **ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ.** แหล่งที่มา: http://www.ozonesolutions.com/info/ozone-solubility, 5 มกราคม 2556.

ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง. 2554. **วิศวกรรมประปาและสุขาภิบาล**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

ธนิต เจนจบ, ยุรนันท์ เล็กน้อย และ วันวิสาข์ จิตเสน. 2553. **การบำบัดน้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรวมตะกอนทางเคมีและโอโซเนชัน.** โครงงานพิเศษ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

ปนัดดา สุผามาลา, พรนภัส วงศ์แสนสุขเจริญ และอภินทร์พร ธนบูลย์จิรัฐ. 2554. **การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียกากส่าที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีและโอโซเนชัน.** โครงงานพิเศษ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

พรรวิษา แกสมาน, ภัทรา คงภักดีและภาณุพงศ์ เพ็งวัน. 2551. **การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน**. โครงงานพิเศษ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

ภาณุมาศ พวงแก้ว. 2548. **กระบวนการโอโซเนชันในการย่อยสลายฟีนอล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. **เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม.** ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2551. **กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ไม่ใช้ออกซิเจน.** แหล่งที่มา: http://www.efe.or.th, 22 สิงหาคม 2556.

วิกิพีเดีย. 2556. **สูตรโครงสร้างอะซิตัลดีไฮด์.** แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Acetaldehyde, 25 กรกฎาคม 2556.

วีระพงศ์ เลิศรัตนเทวี. 2548. **การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานสุราโดยกระบวนการโอโซเนชั่น.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุรพล รักปทุม. 2543. **โอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม.** พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ภาพพิมพ์.

ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. 2556. **สมบัติทางกายภาพของอะซิตัลดีไฮด์.** แหล่งที่มา: http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=84, 12 พฤษภาคม 2556.

Alsheyab, M.A.T. and A.H. Munoz. 2007. Optimisation of ozone production for water and wastewater treatment. **Desalination**. 217:1-7.

APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 21th Edition. USA : American Public Health Association.

Chen, T.Y., C.M. Kao, A. Hong, C.E. Lin. and S.H. Liang. 2009. Application of ozone on the decolorization of reactive dyes – Orange-13 and Blue-19.**Desalination**, 249: 1238-1242

Cheremisinoff, N.P. and P.N Cheremisinoff. 1993. **Water Treatment and Waste Recovery Advanced Technology and Applications.** Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, Newjersey.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Coca, M., M. Pena and G. Gonzalez. 2007. Kinetic study of ozonation of molasses fermentation wastewater**. J. Hazardous Materials.** 149: 364-370.

Contreras, S., M. Rodriguez, F. Al-Momani, C. Sans and S. Esplugas. 2003. Contribution of the ozonation pre-treatment to the biodegradation of aquous solutions of 2,-dichlorphenol. **Water Research** 37 (13): 3167-3171.

de Souza, S.M.d.A.G.U., K.A.S. Bonilla and A.A.U. de Souza. 2010. Removal of COD and color from hydrolyzed textile azo dye by combined ozonation and biological treatment. **J. Hazardous Materials.** 179: 35-42.

Faugnawakig K., N. Sano, D. Yamamoto, T. Kanki, T.Charinpanitkul and W.Tanthapanichakoon 2004. Removal of acetaldehyde in air using a wettedwall corona discharge reactor. **J. Chemical Engineering.** 103:115-122.

Glaze, W.H., H.S. Weinberg, S.W. Krasner and M.J. Sclimenti. 1991. Trends in Aldehyde Formation and Removal Through Plants Using Ozonation and Biological Active Filters. **Conference proceedings**, AWWA, Philadelphia, PA.

Gokcen, F. and A. Ozbelge. 2005. Enhancement of biodegradability by continuous ozonation in Acid Red-151 solutions and kinetic modeling. **J Chemical Engineering.** 114:99-104

Gottschalk, C., J.A. Libra and A. Saupe. 2000. **Ozonation of water and wastewater.** WILEY-VCH. Weinheim.

Hoigné, J. and H. Bader. 1977. The Role of Hydroxyl Radical Reactions in Ozonation Processes in Aqueous Solutions. **Water Res.** 10: 377-386.

IUPAC, 1979. Colorimetric and Fluorimetric Determination of Aldehyde and Ketones. **Pure&Appl. Chem.** 51:1803-1814.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Koch, M., A. Yediler, D. Lienert and A. Kettrup. 2002. Ozonation of hydrolyzed azo dye reactive yellow 84 (CI). **Chemophere,** 46**:** 109-113.

Langlais, B., D.A. Reckhow and D.R. Brink. 1991. **Ozone in water treatment : Application and engineering : cooperative research report.** Chelsea, MI: Lewis.

Lin, S.H. and K.L. Yeh. 1993. Looking to Treat Wastewater? Try Ozone, **Chemical Engineering** 100 (5): 112-116.

Lu, X., B. Yang, J. Chen and R. Sun. 2009. Treatment of wastewater containing azo dye reactive brilliant red X-3B using sequential ozonation upflow biological aerated filter process**. J. Hazardous Materials**. 161: 241-245.

Metcalf and Eddy**.** 2004. **Wastewater engineering : treatment and reuse**. McGraw-Hill**.** Boston**.**

Pena, M., M. Coca, G. Gonzalez, R. Rioja and M.T. Garcia. 2003. Chemical oxidation of wastewater from molasses fermentation with ozone. **Chemosphere**, 51: 893-900.

Sreethawong, T.and S Chavadej. 2008. Color removal of distillery wastewater by ozonation in the absence and presence of immobilized iron oxide catalyst. **J. Hazardous Materials.** 155: 486-493.

Weber, W.J. 1972. **Physicochemical Processes For Water Quality Control.** John Wiley and Sons, Inc., New York.

Zhu, X. and X. X. Hua. 2004. The mechanism of Fe (III) - catalyzed ozonation of phenol. **Univ SCI**. 5(12): 1543-1547.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. การศึกษาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน

1. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการทดลอง

1.1 ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 1 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ 250 ml ละลายในน้ำกลั่น 100 ml เขย่าให้ละลาย

1.2 ปิเปตสารละลาย KIO_3 เข้มข้น 0.10 N ปริมาตร 10 ml ลงไป

1.3 เติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 2 N จำนวน 1 ml

1.4 นำไปไทเทรตด้วย 0.1 N $Na_2S_2O_3$ จนได้สีเหลืองอ่อน

1.5 เติมน้ำแป้ง 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจน ได้สารละลายใส บันทึกปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้

ผลการทดลอง

ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิ KIO_3 3.5697 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 1000 ml ได้ความเข้มข้นKIO_3 0.100076 N ปิเปตสารปฐมภูมิที่ใช้แต่ละครั้ง 10 ml

ตารางผนวกที่ 1 แสดงค่าน้ำหนักของโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ชั่งมาและปริมาตรของโซเดียม-ไทโอซัลเฟตที่ไทเทรตได้

ครั้งที่	น้ำหนักของ KI ที่ชั่งมา (g)	ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ไทเทรตได้ (ml)
1	1.0008	10.00
2	1.0010	10.10
	เฉลี่ย	10.05

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวอย่างการคำนวณ

1.การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารมาตรฐานปฐมภูมิ (KIO_3) (Mw =35.67 g/mol)

$$\text{mol } KIO_3 = NV/1000$$

$$g/MW = NV/1000$$

$$N_{KIO3} = \frac{g \times 1000}{MW \times V} = \frac{3.5697 \times 1000}{35.67 \times 1000}$$

$$N_{KIO3} = 0.100076 \text{ N}$$

2. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไธโอซัลเฟต

$$\text{mol } KIO_3 = \text{mol } Na_2S_2O_3$$

$$(NV)_{KIO3} = (NV)_{Na_2S_2O_3}$$

$$0.10076 \text{ N} \times 10 \text{ ml} = N_{Na_2S_2O_3} \times 10.05 \text{ ml}$$

$$N_{Na_2S_2O_3} = 0.09958 \text{ N}$$

ตารางผนวกที่ 2 แสดงน้ำหนักของโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ชั่งมาและปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ไทเทรตได้ และความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่คำนวณได้

เตรียมสารใหม่ครั้งที่	น้ำหนักของ KI ที่ชั่งมา (g)		ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ไทเทรตได้ (ml)			ความเข้นข้น $Na_2S_2O_3$ (N)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	1.0010	1.0010	9.80	9.80	9.80	0.10212
2	1.0271	1.0010	9.75	9.80	9.775	0.10237

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 3 ผลการหาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซน

ระยะเวลาเดินเครื่อง (min)	ทอลองครั้งที่	ความเข้มข้น $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ (N)	ปริมาณ $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ไตเตรต (ml)						ปริมาณโอโซน (mg)	ปริมาณโอโซนเฉลี่ย (mg)	SD	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)
			Trap A	Trap B	Trap C	Trap D	Trap E	Total				
5	1	0.09958	5.65	0.05	-	-	-	5.70	13.62	13.38	0.63	160.56
	2	0.09958	5.25	0.05	-	-	-	5.30	12.67			
	3	0.09958	5.75	0.05	-	-	-	5.80	13.86			
	color		เหลืองอ่อน	ใสไม่มีสี	-	-	-					
10	1	0.09958	14.30	0.50	0.10	-	-	14.90	35.61	35.85	0.32	215.1
	2	0.09958	14.25	0.80	0.10	-	-	15.15	36.21			
	3	0.09958	14.00	0.85	0.10	-	-	14.95	35.73			
	color		เหลือง	เหลืองอ่อน	ไม่มีสี	-	-					

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ระยะเวลาเดินเครื่อง (min)	ทอลองครั้งที่	ความเข้มข้น $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ (N)	ปริมาณ $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ไตเตรต (ml)						ปริมาณโอโซน (mg)	ปริมาณโอโซนเฉลี่ย (mg)	SD	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)
			Trap A	Trap B	Trap C	Trap D	Trap E	Total				
15	1	0.09958	19.80	0.80	0.10	-	-	20.70	49.47	48.28	1.14	193.12
	2	0.09958	19.15	0.90	0.10	-	-	20.15	48.16			
	3	0.09958	18.50	1.15	0.10	-	-	19.75	47.2			
	color		เหลือง	เหลืองอ่อน	ไม่มีสี	-	-					
20	1	0.09958	27.35	1.70	0.10	-	-	29.15	69.67	69.55	0.55	208.65
	2	0.09958	17.26	1.10	0.10	-	-	28.85	68.95			
	3	0.09958	27.90	1.30	0.10	-	-	29.30	70.02			
	color		เหลือง	เหลืองอ่อน	ไม่มีสี	-	-					

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ระยะเวลาเดินเครื่อง (min)	ทดลองครั้งที่	ความเข้มข้น $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้(N)	ปริมาณ $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ไทเทรต (ml)						ปริมาณโอโซน (mg)	ปริมาณโอโซนเฉลี่ย(mg)	SD	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)
			Trap A	Trap B	Trap C	Trap D	Trap E	Total				
30	1	0.09958	39.55	3.40	0.65	0.05	-	43.65	104.32	106.62	1.99	213.24
	2	0.10212	39.45	3.70	0.75	0.05	-	43.95	107.71			
	3	0.10212	39.15	4.00	0.80	0.05	-	44.00	107.83			
	color		เหลืองเข้ม	เหลือง	เหลืองอ่อน	ไม่มีสี	-					
60	1	0.10212	74.00	5.25	0.90	0.10	-	80.25	196.68	198.23	1.40	198.23
	2	0.10212	73.80	6.55	0.85	0.10	-	81.30	199.01			
	3	0.10212	74.45	5.85	0.90	0.10	-	81.30	199.01			
	color		ส้ม	เหลือง	เหลืองอ่อน	ไม่มีสี	-					
90	1	0.10212	121.75	7.25	1.85	0.35	0.05	131.25	321.68	320.86	1.63	213.91
	2	0.10212	120.20	7.80	1.80	0.30	0.05	130.15	318.98			

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ระยะเวลาเดินเครื่อง (min)	ทดลองครั้งที่	ความเข้มข้น $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้(N)	ปริมาณ $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ไทเทรต (ml)						ปริมาณโอโซน (mg)	ปริมาณโอโซนเฉลี่ย(mg)	SD	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)
			Trap A	Trap B	Trap C	Trap D	Trap E	Total				
90	3	0.10212	120.50	8.85	1.70	0.25	0.05	131.35	321.92			
	color		แดง	ส้ม	เหลือง	เหลืองอ่อน	ไม่มีสี					
120	1	0.10212	135.70	23.4	2.45	0.85	0.15	162.55	398.39	399.48	2.02	199.74
	2	0.10237	130.25	29.25	3.05	0.90	0.10	163.55	401.82			
	3	0.10237	128.75	29.2	3.25	0.75	0.15	162.10	398.26			
	color		แดงเข้ม	ส้ม	เหลือง	เหลืองอ่อน	ไม่มีสี					
150	1	0.10237	125.10	54.30	22.75	5.65	0.95	208.75	512.87	513.12	0.33	205.25
	2	0.10237	129.65	46.95	25.65	6	0.75	209.00	513.49			
	3	0.10237	130.35	47.6	24.85	5.25	0.75	208.80	513.00			
	color		แดงเข้ม	ส้มเข้ม	ส้ม	เหลือง	ไม่มีสี					

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 4 ค่าอัตราการละลายน้ำของโอโซนที่อิ่มตัวในน้ำประปา

ปริมาตรน้ำประปา	ระยะเวลาสัมผัสโอโซน	ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ไทเทรต (ml) ต่อ ผลการทดลอง				โอโซนละลายน้ำเฉลี่ย
	(นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย (ml)	(mg/L)
100 ml	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(28°C)	5	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	10	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15
	15	0.20	0.20	0.20	0.20	0.24
	20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30
	30	0.25	0.25	0.25	0.25	0.31
	40	0.25	0.25	0.25	0.25	0.31
	50	0.25	0.25	0.25	0.25	0.31
	60	0.25	0.25	0.25	0.25	0.31
200 ml	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(28°C)	5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.06
	10	0.20	0.15	0.20	0.18	0.11
	15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.15
	20	0.30	0.35	0.35	0.33	0.20
	30	0.45	0.45	0.45	0.45	0.28
	40	0.50	0.45	0.45	0.48	0.29
	50	0.50	0.45	0.45	0.48	0.29
	60	0.50	0.45	0.45	0.48	0.29

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

ปริมาตรน้ำประปา	ระยะเวลาสัมผัสโอโซน (นาที)	ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ไทเทรต (ml) ต่อ ผลการทดลอง				โอโซนละลายน้ำเฉลี่ย (mg/L)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย (ml)	
300 ml (27°C)	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.15	0.05	0.10	0.10	0.04
	10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.08
	15	0.30	0.20	0.25	0.25	0.10
	20	0.35	0.30	0.35	0.33	0.13
	30	0.65	0.50	0.50	0.50	0.20
	40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.24
	50	0.70	0.70	0.70	0.70	0.29
	60	0.80	0.75	0.80	0.78	0.32
	70	0.80	0.80	0.75	0.78	0.32

หมายเหตุ $Na_2S_2O_3$ที่ใช้เท่ากับ 0.0051 N

การคำนวณหาความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ

ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ = (ปริมาตรไทเทรต x $Na_2S_2O_3$ x 24)/ปริมาตรน้ำประปา (L)

ตัวอย่างการคำนวณ

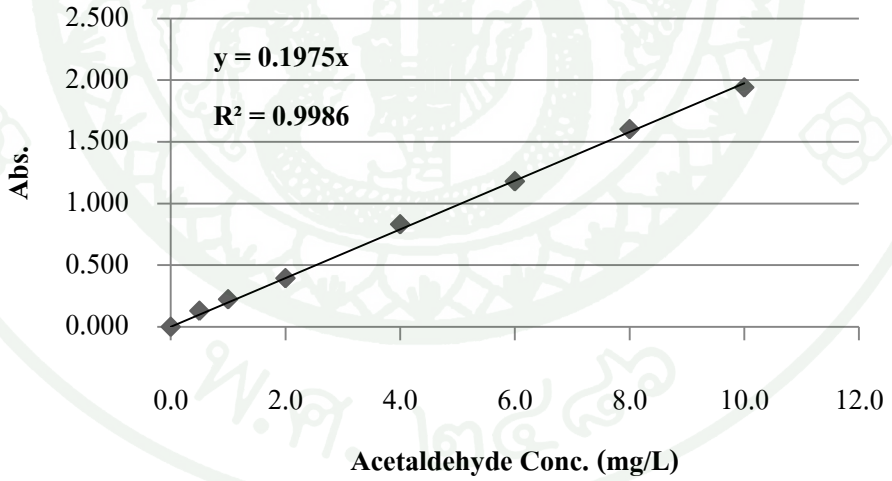
ที่ปริมาตรน้ำประปา 100 ml ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ 0.0051 N ที่ไทเทรตได้ 0.25 ml

ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ = (0.25 x 0.0051 x 24)/0.1 = 0.306 mg/L

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 5 กราฟมาตรฐานของ Acetaldehyde ที่ค่า Absorbance (Abs.) และสารมาตรฐาน Acetaldehyde (mg/l) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น (mg/L)	Absorbance (Abs.)
0.0	0.000
0.5	0.130
1.0	0.223
2.0	0.394
4.0	0.831
6.0	1.179
8.0	1.602
10.0	1.940



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานของ Acetaldehyde (mg/L) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

$$Y = 0.1975x$$

หมายเหตุ x = Concentration (mg/L)

y = Absorbance

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 6 ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบครั้ง (batch) ที่ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร

Acetaldehyde (mg/L)	Feed O_3 (mg)	Dissolved Ozone Conc. (mg/L)	Contact time (hr.)	Absorbance (y = 0.1975x)			Acetaldehyde ที่เหลืออยู่ (mg/L)				SD.	% Removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
10	0.00	0	0.00	1.789	1.963	1.776	9.06	9.94	8.99	9.33	0.53	0.00
	119.39	0.06	0.58	1.015	1.116	0.983	5.14	5.65	4.98	5.26	0.35	43.62
	199.21	0.10	0.97	0.760	0.857	0.760	3.85	4.34	3.85	4.01	0.28	57.02
	398.09	0.20	1.94	0.504	0.518	0.434	2.55	2.62	2.20	2.46	0.23	73.63
	497.69	0.25	2.43	0.393	0.458	0.372	1.99	2.32	1.88	2.06	0.23	77.92
	597.30	0.30	2.92	0.346	0.445	0.339	1.75	2.25	1.71	1.90	0.30	79.64
	699.64	0.30	3.42	0.342	0.377	0.355	1.73	1.91	1.80	1.81	0.09	80.60
	801.97	0.30	3.92	0.336	0.397	0.356	1.70	2.01	1.80	1.84	0.16	80.28

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Acetaldehyde (mg/L)	Feed O_3 (mg)	Dissolved Ozone Conc. (mg/L)	Contact time (hr.)	Absorbance (y = 0.1975x)*5 เท่า			Acetaldehyde ที่เหลืออยู่ (mg/L)				SD	% Removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
25	0.00	0	0.00	1.012	0.992	0.987	25.62	25.11	24.99	25.24	0.33	0.00
	119.39	0.06	0.58	0.682	0.644	0.663	17.27	16.30	16.78	16.78	0.48	33.52
	199.21	0.10	0.97	0.576	0.544	0.522	14.58	13.77	13.22	13.86	0.69	45.09
	398.09	0.20	1.94	0.414	0.423	0.411	10.48	10.71	10.41	10.53	0.16	58.28
	497.69	0.25	2.43	0.364	0.366	0.361	9.22	9.27	9.14	9.21	0.06	63.51
	597.30	0.30	2.92	0.357	0.355	0.352	9.04	8.99	8.91	8.98	0.06	64.42
	699.64	0.30	3.42	0.354	0.343	0.352	8.96	8.68	8.91	8.85	0.15	64.94
	801.97	0.30	3.92	0.350	0.347	0.348	8.86	8.78	8.81	8.82	0.04	65.06

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Acetaldehyde (mg/L)	Feed O_3 (mg)	Dissolved Ozone Conc. (mg/L)	Contact time (hr.)	Absorbance (y = 0.1975x)*10เท่า			Acetaldehyde ที่เหลืออยู่ (mg/L)				SD	% Removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
50	0.00	0	0.00	0.961	1.003	1.020	48.66	50.78	51.65	50.36	1.54	0.00
	119.39	0.06	0.58	0.739	0.863	0.813	37.42	43.70	41.16	40.76	3.16	19.06
	199.21	0.10	0.97	0.663	0.659	0.654	33.57	33.37	33.11	33.35	0.23	33.78
	398.09	0.20	1.94	0.503	0.518	0.542	25.47	26.23	27.44	26.38	1.00	47.62
	497.69	0.25	2.43	0.493	0.511	0.509	24.96	25.87	25.77	25.54	0.50	49.29
	597.30	0.30	2.92	0.482	0.485	0.488	24.41	24.56	24.71	24.56	0.15	51.23
	699.64	0.30	3.50	0.487	0.488	0.493	24.66	24.71	24.96	24.78	0.16	50.79
	801.97	0.30	4.00	0.481	0.493	0.492	24.35	24.96	24.91	24.74	0.34	50.87

หมายเหตุ อัตราการผลิตโอโซน 204.67 mg/L อัตราการไหลของอากาศ 3.5 L/min

Feed O_3 = ปริมาณโอโซน (mg) ที่ใส่ลงในน้ำเสีย

Dissolved ozone concentration = ความเข้มข้นโอโซนที่ละลายในน้ำ (mg/L)

Contact time = ระยะเวลาสัมผัสโอโซน (hr)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 7 ค่าซีโอดีของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบครั้ง (batch) ที่ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร

Acetaldehyde (mg/L)	Feed O_3 (mg)	Dissolved Ozone Conc. (mg/L)	Contact time (hr.)	ปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรต (ml)			COD (mg/L)				SD	% Removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
				FAS 0.04854 N	FAS 0.04914 N	FAS 0.0489 N						
Blank				6.10	6.025	6.05						
10	0.00	0.00	0.00	5.75	5.7	5.6	27.18	25.55	35.21	29.31	5.17	0.00
	119.39	0.06	0.58	5.8	5.75	5.75	23.30	21.62	23.47	22.80	1.02	22.21
	199.21	0.10	0.97	5.85	5.8	5.8	19.42	17.69	19.56	20.19	1.04	31.12
	398.09	0.20	1.94	5.90	5.85	5.85	15.53	13.76	15.65	16.28	1.06	44.46
	597.30	0.30	2.92	5.95	5.90	5.9	11.65	9.83	11.74	12.38	1.08	57.76
25	0.00	0.00	0.00	5.1	5.10	5.10	77.66	72.73	74.33	74.91	2.52	0.00
	119.39	0.06	0.58	5.25	5.25	5.25	66.01	60.93	62.59	63.18	2.59	15.66
	199.21	0.10	0.97	5.3	5.30	5.30	62.13	57.00	58.68	59.27	2.62	20.88
	398.09	0.20	1.94	5.45	5.42	5.40	50.48	47.57	50.86	49.64	1.80	33.73
	597.30	0.30	2.92	5.55	5.50	5.50	42.72	41.28	43.03	42.34	0.93	43.48
50	0.00	0.00	0.00	4.50	4.50	4.40	124.26	119.90	129.10	124.42	4.60	0.00
	119.39	0.06	0.58	4.65	4.60	4.65	112.61	112.04	109.54	111.40	1.64	10.46
	199.21	0.10	0.97	4.75	4.75	4.75	104.85	100.25	101.71	102.27	2.35	17.80
	398.09	0.20	1.94	4.95	4.90	4.90	89.31	88.45	89.98	89.25	0.76	28.27
	597.30	0.30	2.92	5.10	5.00	5.07	77.66	80.59	76.68	78.31	2.04	37.06

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การคำนวณหาค่าซีโอดี

$$COD = \frac{(A - B) \times (8000M)}{C}$$

เมื่อ COD = ค่าซีโอดี หน่วยเป็น (mg/L)

A = ปริมาตรของสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (ml)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ ในการไทเทรตตัวอย่าง (ml)

M = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Molar)

C = ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ 5 ml

ตารางผนวกที่ 8 ผลของค่าBOD_5/COD ที่การบำบัดอะซิตัลดีไฮด์ด้วยโอโซเนชันแบบครั้ง (Batch)

Acetaldehyde (mg/L)	**Dissolved ozone concentration (mg/L)**	**BOD**	**COD**	**BOD_5/COD**	**% การกำจัด BOD**
10 mg/L	0.00	4.50	35.21	0.1278	72.72
	0.30	5.50	11.74	0.4685	
25 mg/L	0.00	13.25	72.73	0.1822	49.01
	0.30	14.75	41.28	0.3573	
50 mg/L	0.00	26.50	124.26	0.2133	43.85
	0.30	29.50	77.66	0.3799	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 9 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 0.58 hr.

Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/L)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Absorbance (y = 0.1975x)			Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	0.58	0.00	0.00	7.42	1.963	1.883	1.953	9.94	9.53	9.89	9.79	0.00
			19.78	0.10	7.68	1.795	1.799	1.781	9.09	9.11	9.02	9.07	7.35
			39.91	0.20	7.66	1.604	1.632	1.653	8.12	8.26	8.37	8.25	15.73
			79.48	0.39	7.54	1.418	1.436	1.450	7.18	7.27	7.34	7.26	25.84
			119.39	0.58	7.48	1.300	1.309	1.339	6.58	6.63	6.78	6.66	31.97
			221.73	1.08	7.32	1.189	1.232	1.252	6.02	6.24	6.34	6.20	36.67
			324.06	1.58	7.38	1.185	1.211	1.221	6.00	6.13	6.18	6.10	37.69
			426.40	2.08	7.32	1.203	1.192	1.203	6.09	6.04	6.09	6.07	38.00

หมายเหตุ อัตราการไหลของอากาศ 3.5 L/min อัตราการไหลของน้ำเสีย 29 ml/min

Contact time = ระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสีย

Feed O_3 = ปริมาณโอโซน (mg) ที่ใส่ลงในน้ำเสีย

Run time = ระยะเวลาเดินระบบโอโซเนชัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 10 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 0.97 hr.

Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/L)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Absorbance (y = 0.1975x)			Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	0.97	0.00	0.00	7.76	1.899	1.912	1.921	9.62	9.68	9.73	9.67	0.00
			19.78	0.10	8.13	1.611	1.726	1.75	8.16	8.74	8.86	8.59	11.17
			39.91	0.20	8.21	1.455	1.689	1.698	7.37	8.55	8.60	8.17	15.51
			79.48	0.39	8.14	1.334	1.390	1.521	6.75	7.04	7.70	7.16	25.96
			119.39	0.58	7.89	1.255	1.260	1.307	6.35	6.38	6.62	6.45	33.30
			159.30	0.78	7.74	1.110	1.211	1.161	5.62	6.13	5.88	5.88	39.19
			199.21	0.97	7.62	1.088	1.163	1.056	5.51	5.89	5.35	5.58	42.30
			301.55	1.47	7.66	0.956	1.051	1.025	4.84	5.32	5.19	5.12	47.05
			403.87	1.97	7.65	0.926	1.010	1.017	4.69	5.11	5.15	4.98	48.50
			506.22	2.47	7.60	0.933	0.945	0.961	4.72	4.78	4.87	4.79	50.47
			608.56	2.97	7.62	0.884	0.989	0.935	4.48	5.01	4.73	4.74	50.98

หมายเหตุ อัตราการไหลของอากาศ 3.5 L/min อัตราการไหลของน้ำเสีย 17 ml/min

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 11 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่อง (continuous) ที่ Contact time 1.95 hr.

Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/L)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Absorbance (y = 0.1975x)			Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	1.94	0.00	0.00	7.88	2.225	1.765	1.805	11.27	8.94	9.14	9.78	0.00
			19.78	0.10	8.18	1.982	1.670	1.719	10.04	8.46	8.70	9.06	7.36
			39.91	0.20	8.02	1.807	1.541	1.545	9.15	7.80	7.82	8.26	15.54
			79.48	0.39	8.12	1.555	1.233	1.325	7.87	6.24	6.71	6.94	29.04
			119.39	0.58	8.00	1.413	1.079	1.160	7.15	5.46	5.87	6.16	37.01
			159.30	0.78	8.04	1.254	0.962	1.040	6.35	4.87	5.27	5.50	43.76
			199.21	0.98	8.14	1.067	0.883	0.995	5.40	4.47	5.04	4.97	49.18
			298.48	1.47	8.04	0.897	0.758	0.893	4.54	3.84	4.52	4.30	56.03
			398.09	1.95	7.82	0.844	0.748	0.829	4.27	3.79	4.20	4.09	58.18
			602.76	2.95	7.78	0.774	0.737	0.725	3.92	3.73	3.67	3.77	61.45
			807.43	3.95	7.76	0.772	0.684	0.721	3.91	3.46	3.65	3.67	62.47
			1,012.1	4.95	7.77	0.795	0.707	0.646	4.03	3.58	3.27	3.63	62.88
			1,216.8	5.95	7.75	0.782	0.691	0.644	3.65	3.30	3.16	3.37	65.54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 12 ความเข้มข้นของอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านกระบวนการโอโซเนชันแบบต่อเนื่องที่ (continuous) ที่Contact time 2.92 hr.

Acetaldehyde (mg/L)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/L)	Contact time (hr.)	Feed O_3 (mg)	Run time (hr.)	pH	Absorbance (y = 0.1975x)			Acetaldehyde (mg/L)				% Removal
						Run 1	Run 2	Run 3	Run 1	Run 2	Run 3	เฉลี่ย	
10	204.67	2.92	0.00	0.00	7.42	2.566	2.113	2.184	12.99	10.70	11.06	11.58	0.00
			19.78	0.10	7.78	2.336	1.882	1.902	11.83	9.53	9.63	10.33	10.79
			39.91	0.20	7.76	2.176	1.673	1.724	11.02	8.47	8.73	9.41	18.74
			79.48	0.39	7.77	1.906	1.402	1.479	9.65	7.10	7.49	8.08	30.22
			119.39	0.58	7.80	1.627	1.203	1.390	8.24	6.09	7.04	7.12	38.51
			159.30	0.78	7.72	1.465	1.057	1.256	7.42	5.35	6.36	6.38	44.91
			199.21	0.97	7.68	1.207	0.916	1.086	6.11	4.64	5.50	5.42	53.20
			298.48	1.46	7.52	1.053	0.754	0.912	5.33	3.82	4.62	4.59	60.36
			398.09	1.94	7.45	0.966	0.650	0.810	4.89	3.29	4.10	4.09	64.68
			497.69	2.43	7.39	0.831	0.600	0.717	4.21	3.04	3.63	3.63	68.65
			597.30	2.92	7.38	0.731	0.573	0.689	3.70	2.90	3.49	3.36	70.98
			801.97	3.92	7.36	0.754	0.541	0.646	3.82	2.74	3.27	3.28	71.68
			1,006.65	4.92	7.37	0.679	0.456	0.594	3.44	2.31	3.01	2.92	74.78
			1,211.32	5.92	7.34	0.731	0.512	0.557	3.70	2.59	2.82	3.04	73.75
			1,415.99	6.92	7.33	0.691	0.490	0.598	3.50	2.48	3.03	3.00	74.09
			1,620.66	7.92	7.31	0.683	0.500	0.573	3.46	2.53	2.90	2.96	74.44

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 สัดส่วนอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดต่อปริมาณโอโซนที่ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์เริ่มต้น 10 mg/L

Run No.	Air flow (L/min)	อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)	โอโซนที่อิ่มตัวในน้ำ (mg/L)	V net (L)	Q (ml/min)	θ (hr)	Feed O_3 (mg)	Feed O_3 (mg/L)	C_0	C_e	C_0-C_e	η	Acetaldehyde ที่ถูกกำจัด/ mg O_3
C-1	3.5	204.67	0.304	1	29	0.58	119.39	119.39	9.79	6.66	3.13	31.97	0.026
C-2	3.5	204.67	0.304	1	17	0.97	199.21	199.21	9.67	5.58	4.09	42.30	0.021
C-3	3.5	204.67	0.304	1	8.57	1.95	398.09	398.09	9.78	4.09	5.69	58.18	0.014
C-4	3.5	204.67	0.304	1	5.71	2.92	597.30	597.30	11.58	3.36	8.22	70.98	0.014

หมายเหตุ Air flow = อัตราการไหลของอากาศ (L/min)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์ (L/min)

θ = ระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสียอะซิตัลดีไฮด์ (min)

Feed O_3 = ปริมาณโอโซน (mg) ที่ใส่ลงในน้ำเสีย 1 ลิตร

C_0 = ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์เริ่มต้นเฉลี่ย (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์หลังผ่านโอโซนเฉลี่ย (mg/L)

C_0 - C_e = ความเข้มข้นอะซิตัลดีไฮด์ที่ถูกกำจัด (mg/L)

η = ประสิทธิภาพการกำจัดอะซิตัลดีไฮด์ (%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การคำนวณ

1. Feed O_3 (mg)

$$\text{Feed } O_3 \text{ (mg)} = \text{อัตราการผลิต (mg/hr.)} \times \text{ระยะเวลาสัมผัส (min)} \times \frac{1\text{hr.}}{60\text{ min}}$$

2. Feed O_3 (mg/L)

$$\text{Feed } O_3 \text{ (mg/L)} = \frac{\text{อัตราการผลิตโอโซน (mg/hr.)}}{\text{อัตราการไหลของน้ำเสีย (ml/min)}} \times \frac{1\text{hr.}}{60\text{ min}} \times \frac{1000\text{ ml}}{1\text{L}}$$

ตารางผนวกที่ 14 ผลของกระบวนการโอโซนเนชันที่สภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง

Run No.	**Contact time (hr.)**	**ทดลอง**	**COD**	**BOD_5**	**BOD_5/COD**	**% การกำจัด COD**	**% การกำจัด BOD**
C-1	0.58	ก่อนบำบัด	31.84	3.50	0.1099	17.49	35.84
		หลังบำบัด	26.27	4.50	0.1713		
C-2	0.97	ก่อนบำบัด	28.22	3.50	0.1240	34.27	53.99
		หลังบำบัด	18.55	5.00	0.2695		
C-3	1.95	ก่อนบำบัด	34.95	5.00	0.1431	44.43	60.29
		หลังบำบัด	19.42	7.00	0.3604		
C-4	2.92	ก่อนบำบัด	27.58	3.50	0.1269	57.14	75.00
		หลังบำบัด	11.82	6.00	0.5076		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

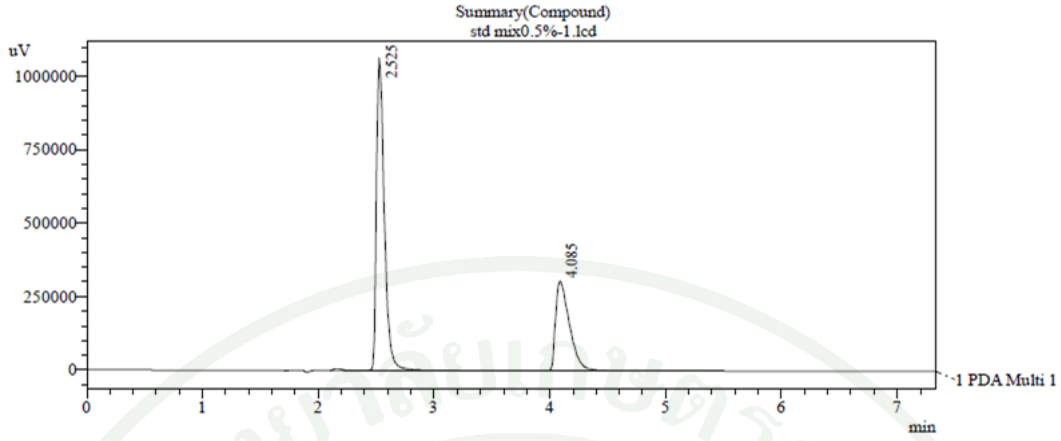
ตารางผนวกที่ 15 HPLC Condition for Organic acid (Method Inertsil Column)

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
Mobile phase	0.1% orthophosphoric acid
Flow rate	1.0 mL/min
HPLC Column	4.6x250 mm, 5µm, C18
Column Oven	30 ˚ C
PDA Detector	210 nM
Injection Volume	20 µL

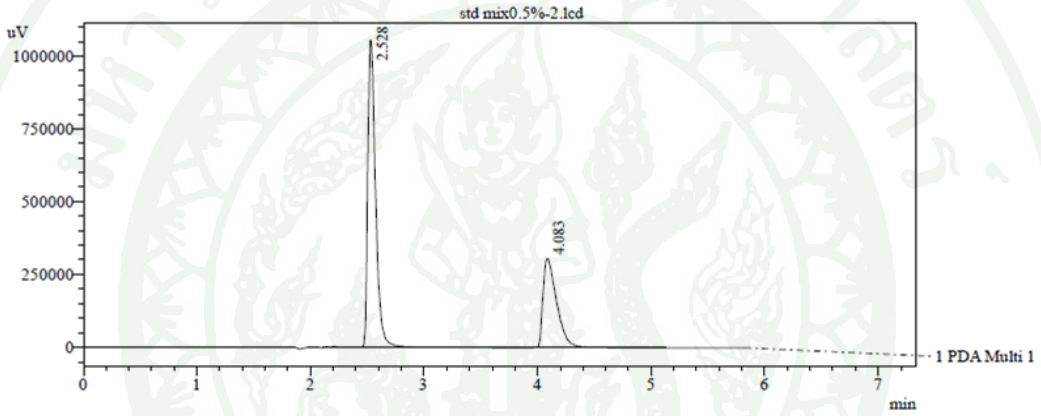
ตารางผนวกที่ 16 Shimadzu HPLC

พารามิเตอร์	รุ่น
Pump	LC-20AD
Detector	SPD-M20A
Column Oven	CTO-10Asvp
Injector	Rheodyne 7725i

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(1)



(2)

ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานของ formic acid และ acetic acid ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2

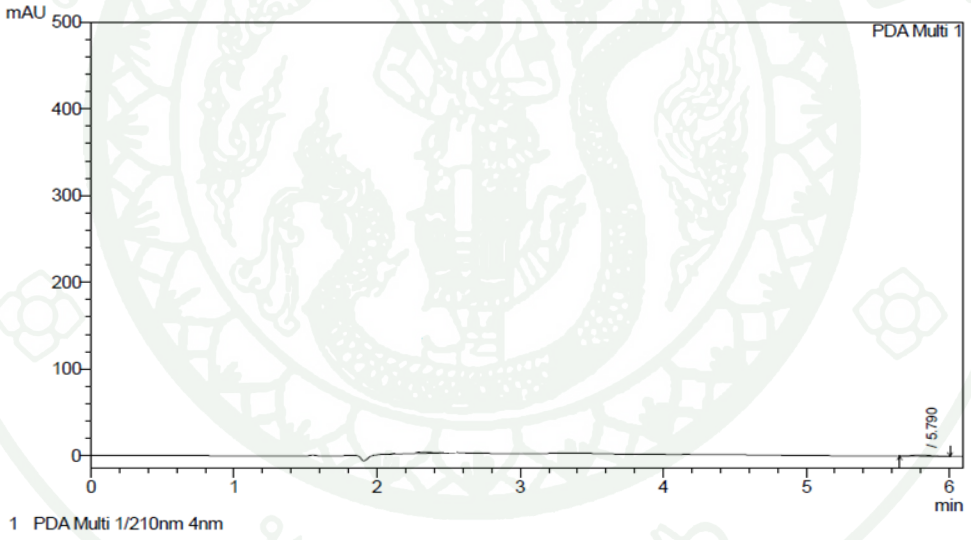
ตารางผนวกที่ 17 พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของFormic acid

Title	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units
std mix0.5%-1.lcd	2.525	5065318	1064466	4985.959	ppm
std mix0.5%-2.lcd	2.528	5093846	1055794	5014.041	ppm
Average	2.527	5079582	1060130	5000.000	
%RSD	0.066	0.397	0.578	0.397	
Maximum	2.528	5093846	1064466	5014.041	
Minimum	2.525	5065318	1055794	4985.959	
Standard Deviation	0.002	20172	6132	19.856	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 18 พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของ Acetic acid

Title	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units
std mix0.5%-1.lcd	4.085	2531506	304377	4987.672	ppm
std mix0.5%-2.lcd	4.083	2544020	307042	5012.328	ppm
Average	4.084	2537763	305709	5000.000	
%RSD	0.030	0.349	0.616	0.349	
Maximum	4.085	2544020	307042	5012.328	
Minimum	4.083	2531506	304377	4987.672	
Standard Deviation	0.001	8849	1884	17.434	

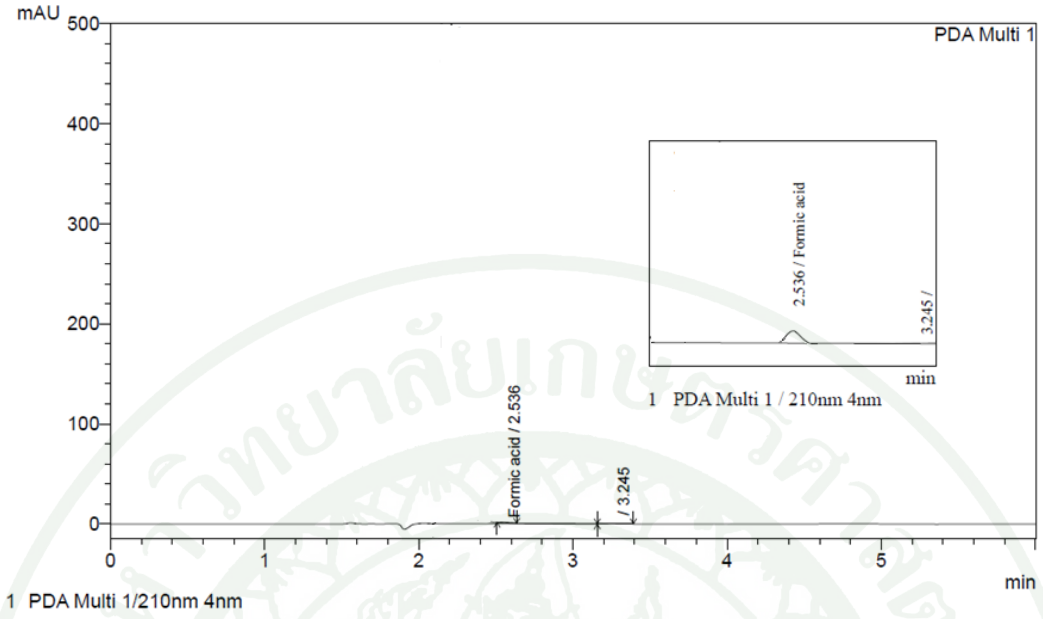


ภาพผนวกที่ 3 โครมาโทแกรมของอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L ก่อนบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่อง

ตารางผนวกที่ 19 พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของกรดชนิดต่าง ๆ ก่อนบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่อง

ID	Name	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units
1	Formic acid	0.000	0	0	0.000	ppm
2	Acetic acid	0.000	0	0	0.000	ppm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

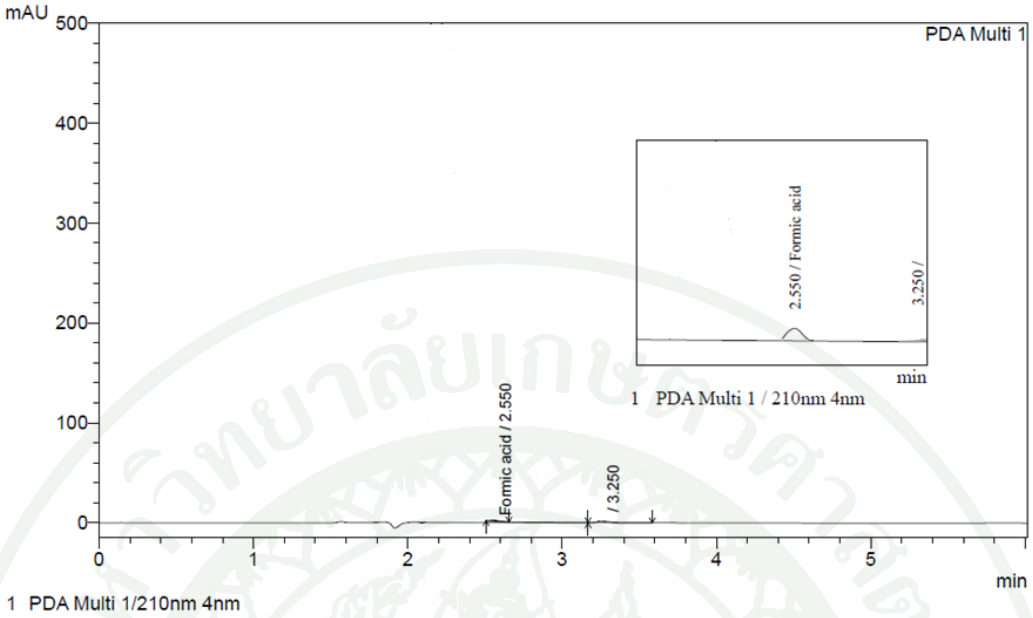


ภาพผนวกที่ 4 โครมาโทแกรมของอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L หลังบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่องที่ Contact time 2.92 hr.น้ำตัวอย่างที่ 1

ตารางผนวกที่ 20 พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของกรดชนิดต่าง ๆ หลังบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่องที่ที่ Contact time 2.92 hr.น้ำตัวอย่างที่ 1

ID	Name	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units
1	Formic acid	2.536	1044	293	1.028	ppm
2	Acetic acid	0.000	0	0	0.000	ppm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ 5 โครมาโทแกรมของอะซิตัลดีไฮด์ 10 mg/L หลังบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่องที่ Contact time 2.92 hr.น้ำตัวอย่างที่ 2

ตารางผนวกที่ 21 พื้นที่ใต้กราฟ (mAU) ของกรดชนิดต่าง ๆ หลังบำบัดด้วยโอโซนแบบต่อเนื่องที่ Contact time 2.92 hr.น้ำตัวอย่างที่ 2

ID	Name	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units
1	Formic acid	2.550	3138	873	3.089	ppm
2	Acetic acid	0.000	0	0	0.000	ppm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประกาศกรมควบคุมมลพิษ

เรื่อง กำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา ๒๔ ชั่วโมง

โดยที่เป็นการสมควรกำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา ๒๔ ชั่วโมง ทั้งสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds) ในบรรยากาศ โดยทั่วไปที่เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) และสารที่มิได้เป็นสารก่อมะเร็ง (non-carcinogen) ซึ่งอาจมีความเข้มข้นสูงในช่วงเวลา ๒๔ ชั่วโมง จนส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศและอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่สัมผัสโดยการหายใจเข้าสู่ร่างกาย แม้ว่าปริมาณของสา รอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศดังกล่าว จะไม่เกินมาตรฐานตามที่กำหนดไว้ในประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ ๓๐ (พ.ศ. ๒๕๕๐) เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา ๑ ปี

ดังนั้น กรมควบคุมมลพิษในฐานะหน่วยงานที่มีภารกิจเกี่ยว กับการกำกับ ดูแล อำนวยการประสานงาน ติดตาม และประเมินผลเกี่ยวกับการฟื้นฟู คุ้มครอง และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมจึงออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ กำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา ๒๔ ชั่วโมงไว้ ดังต่อไปนี้

(๑) อะซิทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) ต้องไม่เกิน ๘๖๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๒) อะครอลีน (Acrolein) ต้องไม่เกิน ๐.๕๕ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๓) อะคริโลไนไตร (Acrylonitrile) ต้องไม่เกิน ๑๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๔) เบนซีน (Benzene) ต้องไม่เกิน ๗.๖ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๕) เบนซิลคลอไรด์ (Benzyl Chloride) ต้องไม่เกิน ๑๒ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๖) ๑, ๓ - บิวทาไดอีน (1, 3 - Butadiene) ต้องไม่เกิน ๕.๓ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๗) โบรโมมีเธน (Bromomethane) ต้องไม่เกิน ๑๕๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๘) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) ต้องไม่เกิน ๑๕๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๙) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ต้องไม่เกิน ๕๗ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(๑๐) ๑, ๒ - ไดโบรโมอีเธน (1, 2 - Dibromoethane) ต้องไม่เกิน ๓๗๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๑) ๑, ๔ - ไดคลอโรเบนซีน (1, 4 - Dichlorobenzene) ต้องไม่เกิน ๑,๑๐๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๒) ๑, ๒ - ไดคลอโรอีเธน (1, 2 - Dichloroethane) ต้องไม่เกิน ๔๘ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๓) ไดคลอโรมีเธน (Dichloromethane) ต้องไม่เกิน ๒๑๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๔) ๑, ๒ - ไดคลอโรโพรเพน (1, 2 - Dichloropropane) ต้องไม่เกิน ๘๒ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๕) ๑, ๔ - ไดออกเซน (1, 4 - Dioxane) ต้องไม่เกิน ๘๖๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๖) เตตระคลอโรเอทธิลีน (Tetrachloroethylene) ต้องไม่เกิน ๔๐๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๗) ๑, ๑, ๒, ๒ - เตตระคลอโรอีเธน (1, 1, 2, 2 - Tetrachloroethane) ต้องไม่เกิน๘๓ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๘) ไตรคลอโรเอทธิลีน (Trichloroethylene) ต้องไม่เกิน ๑๓๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(๑๙) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride) ต้องไม่เกิน ๒๐ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ข้อ ๒ หลักการ ขอบเขต และการคำนวณ วิธีการเก็บตัวอย่าง การตรวจวัด และเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา ๒๔ ชั่วโมง ปรากฏตามภาคผนวกท้ายประกาศนี้

ประกาศ ณ วันที่ ๑๘ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๑

สุพัฒน์ หวังวงศ์วัฒนา

อธิบดีกรมควบคุมมลพิษ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 22 Maximum Dissolved Oxygen Concentration Saturation Table

Temperature (degrees C)	DO (mg/L)	Temperature (degrees C)	DO (mg/L)
0	14.60	23	8.56
1	14.19	24	8.40
2	13.81	25	8.24
3	13.44	26	8.09
4	13.09	27	7.95
5	12.75	28	7.81
6	12.43	29	7.67
7	12.12	30	7.54
8	11.83	31	7.41
9	11.55	32	7.28
10	11.27	33	7.16
11	11.01	34	7.05
12	10.76	35	6.93
13	10.52	36	6.82
14	10.29	37	6.71
15	10.07	38	6.61
16	9.85	39	6.51
17	9.65	40	6.41
18	9.45	41	6.31
19	9.26	42	6.22
20	9.07	43	6.13
21	8.90	44	6.04
22	8.72	45	5.95

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวพรนภัส วงศ์แสนสุขเจริญ
เกิดวันที่	6 พฤศจิกายน 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดจันทบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
นำเสนอผลงานที่	งานการประชุมวิชาการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13 (13rd International Conference on Environmental Engineering, Science and Management) วันที่ 26-28 มีนาคม พ.ศ. 2557 โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์