

85

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



T107764



นายภิญโญ กุลคำแสง
นายยุทธพงษ์ พูลวิริยะ

รฟท.
๓ 5 ๒๔/๑
๒๕๔๘

เลขหางู.....
เลขทะเบียน.....107764
วัน,เดือน,ปี..... 10 พ.ค. 2553

b.....12210213
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Treatment of Formaldehyde Synthetic Wastewater by Ozone and Hydrogenperoxide

Mr. Pinyo Kulacamsang

Mr. Yuttarpong Poonwattana



**A Special Project Submitted in Partial Fulfilment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นักศึกษา นาย ภิญโญ กุละคำแสง

นาย ยุทธพงษ์ พูลวัฒน์

ภาควิชา เคมี

สาขา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชลอ จารุสุทธีรักษ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
ปัญหาพิเศษ/โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน	
กรรมการ ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	
กรรมการ ดร. ชลอ จารุสุทธีรักษ์	

(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

**ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นักศึกษา นาย ภิญโญ กุลละคำแสง
นาย ยุทธพงษ์ พูลวัฒน์

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

สาขา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชลอ จารุสุทธีรักษ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนและโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ จากการทดลองพบว่าการใช้โอโซนในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่พีเอชเป็นกรด (พีเอช 3) และที่พีเอชเป็นเบส (พีเอช 12) ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุดคือ ร้อยละ 24 และ 26 ตามลำดับ การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์สูงกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว โดยที่พีเอชเท่ากับ 12 ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26 เป็น 51 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จาก 60 ถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้อัตราการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 51 เป็น 91 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาพบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์และ โอโซนจัดเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายตัวอันดับสอง ในขณะที่การสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์โดยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 10 นาทีแรก ขึ้นกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และมีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกันทุกความเข้มข้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไปแล้ว 10 นาที ซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามหลักการ Pseudo first order

คำสำคัญ : โอโซน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

Special Project Title Treatment of formaldehyde synthetic wastewater by ozone and Hydrogen peroxide
Name Mr. Pinyo Kulacamsang
Mr.Yuttarpong Poonwattana
Department Chemistry
Program Environmental Chemistry
Academic Year 2005
Special Project Advisor Dr. Chalor Jarusutthirak

ABSTRACT

This special project studied the treatment of formaldehyde in synthetic wastewater using ozone (O_3) and ozone combined with hydrogenperoxide (H_2O_2). The effects of pH and hydrogen peroxide concentration. On formaldehyde treatment efficiency were investigated.

The results showed that, with ozone alone, formaldehyde was removed up to 24% at acidic condition (pH 3) and 26% at basic condition (pH 12).The combination of ozone and hydrogen peroxide provided more treatment efficiency than using ozone alone. The optimum pH for formaldehyde removed using ozone and hydrogen peroxide was found to be 12. At this pH, the removal efficiency for formaldehyde increased from 26% to 51%, in comparison between ozone alone and ozone combined with hydrogen peroxide. The increase of hydrogen peroxide concentration from 60 to 250 mg/l led to an increase of formaldehyde removal efficiency from 51% to 91%.

The study of chemical kinetics for formaldehyde degradation revealed that the reaction of formaldehyde and ozone was second-order reaction. The degradation of formaldehyde by ozone combined with hydrogen peroxide was dependent on hydrogen peroxide concentration at the first 10 minutes. After that, the degradation of formaldehyde followed Pseudo-first order reaction.

From experimental was found the formaldehyde removal by ozone at acid condition (pH 3) and base condition (pH 12) was the effective optimum operating removal was 24 % and 26 % respectively. Which was used ozone combined with hydrogenperoxide on effective formaldehyde removal higher than was used ozone alone. Through at pH 12 ,increase the effective formaldehyde removal also ozone combined with hydrogenperoxide from 26 % to 51 % , the comparison with was used ozone alone. To increase of hydrogenperoxide concentration. The effect ratio formaldehyde removal to increase from 51 % to 91 % at pH 12. Which hydrogenperoxide concentration from 60 to 250 mg/l.

From study chemical kinetic was found the employed ozone alone on formaldehyde removal is second order reaction. When to used ozone combined with hydrogenperoxide. Before reaction rate to fast in 10 minute and after 10 minute the pseudo first order reaction.

Keywords : Ozone, Hydrogenperoxide, Avance Oxidation.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่กรุณาให้คำปรึกษาระหว่างการค้นคว้าวิจัย และการเขียนโครงการพิเศษฉบับนี้ รวมถึงการตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษให้ถูกต้องและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.สุวรรณ ี จรรยาพูน และ ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ที่เป็นคณะกรรมการในโครงการพิเศษ และช่วยในการตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชมพูนุช ไชยรักษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ และเงินทุนสนับสนุนที่ใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทภาควิชาเคมี ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ด้วยความเคารพยิ่ง และขอบคุณเพื่อนๆและทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการศึกษามาตลอดรวมถึงมีส่วนช่วยให้โครงการพิเศษฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

นาย ภิญโญ กุลละคำแสง

นาย บุทธพงษ์ พูลวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ฟอรั่มลดีไฮด์	3
2.1.1 คุณสมบัติของฟอรั่มลดีไฮด์	3
2.1.2 ผลของฟอรั่มลดีไฮด์ต่อมนุษย์	3
2.1.3 ผลของฟอรั่มลดีไฮด์ต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ	3
2.2 ไอโซน	5
2.2.1 คุณสมบัติของไอโซน	5
2.2.2 การผลิตไอโซน	6
2.2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไอโซน	7
2.2.3 จลนศาสตร์ของไอโซนในน้ำ	8
2.2.3.1 ปฏิริยาออกซิเดชันทางตรง	8
2.2.3.2 ปฏิริยาออกซิเดชันทางอ้อม	8
2.3 จลนพลศาสตร์เคมี	9
2.3.1 ปฏิริยาอันดับศูนย์	9
2.3.2 ปฏิริยาอันดับหนึ่ง	10
2.3.3 ปฏิริยาอันดับสอง	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.4 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง	12
2.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟอร์มัลดีไฮด์	17
2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณ โอโซน	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	22
3.2 สารเคมี	22
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	23
3.3.1 การติดตั้งถังปฏิกรณ์	24
3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	25
3.3.3 การทดสอบการผลิต โอโซนด้วยเครื่องผลิต โอโซน	25
3.3.4 การศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วย โอโซน	25
3.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วย โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	26
3.3.5.1 ผลของพีเอช	26
3.3.5.2 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	26
3.3.6 การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	
4.1 การทดสอบการผลิต โอโซนด้วยเครื่องผลิต โอโซน	28
4.2 ผลของพีเอชต่อการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วย โอโซน	29
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วย โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	31
4.3.1 ผลของพีเอช	31
4.3.2 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำ	34
4.4.1 การบำบัดด้วยโอโซน	34
4.4.2 การบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและการเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์	
ก-1 การวิเคราะห์โอโซน	45
ก-2 การวิเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์	48
ภาคผนวก ข.	
ข-1 การทดสอบการผลิตโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซน	53
ข-2 การทดสอบการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์	56
ข-3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของฟอร์มัลดีไฮด์	57
ภาคผนวก ค. ผลการทดลอง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพเคมีของฟอร์มัลดีไฮด์	4
ตารางที่ 2.2 สมบัติกายภาพของไอโซน	5
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (E^0) ของตัวออกซิไดซ์	18
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง	27
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับ ไอโซน	34
ตารางที่ 4.2 ผลจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ฟอร์มัลดีไฮด์กับ ไอโซน ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	36
ตารางที่ ก-1 ผลการทำกราฟมาตรฐาน ไอโซน	47
ตารางที่ ก-2 ผลการไทเทรตสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์กับสารละลายกรดซัลฟิวริก	49
ตารางที่ ก-3 ผลการทำกราฟมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์	50
ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิต ไอโซน	53
ตารางที่ ข-2 ผลการคำนวณปริมาณ ไอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิต ไอโซน	54
ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิต ไอโซน	54
ตารางที่ ข-4 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์	56
ตารางที่ ข-5 ผลการคำนวณจลนพลศาสตร์	57
ตารางที่ ข-6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับ ไอโซน	59
ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิต ไอโซน	61
ตารางที่ ค-2 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ไอโซนที่พีเอช 3	62
ตารางที่ ค-3 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ไอโซนที่พีเอช 5	63
ตารางที่ ค-4 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ไอโซนที่พีเอช 7	64
ตารางที่ ค-5 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ไอโซนที่พีเอช 9	65
ตารางที่ ค-6 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ไอโซนที่พีเอช 12	66
ตารางที่ ค-7 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ไอโซน ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 7	67
ตารางที่ ค-8 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ไอโซน ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 9	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ตารางที่ ค-9 ผลการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียดังเคราะห์ด้วยโอโซน ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 12	69
ตารางที่ ค-10 ผลการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่พีเอช 12 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	70
ตารางที่ ค-11 ผลการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่พีเอช 12 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 พื้นฐานในการผลิตโอโซน	6
รูปที่ 2.2 อัตราการไหลของออกซิเจนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานปริมาณและความเข้มข้นของ โอโซน	7
รูปที่ 2.3 ปฏิริยา กับสารตั้งต้นกับ โอโซนและปฏิริยาการย่อยสลายโอโซน	9
รูปที่ 2.4 รูปแสดงการย่อยสลายสารแบบปฏิริยาอันดับศูนย์	10
รูปที่ 2.5 รูปแสดงการย่อยสลายสารแบบปฏิริยาอันดับหนึ่ง	11
รูปที่ 2.6 รูปแสดงการย่อยสลายสารแบบปฏิริยาอันดับสอง	12
รูปที่ 2.7 การหา Pseudo first – order ของการย่อยสลายโอโซน โดยแปรค่าความเข้มข้นของ HO_2^-	14
รูปที่ 2.8 กระบวนการย่อยสลายโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไอออน	15
รูปที่ 2.9 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของ MIB และ Geosmin ในแม่น้ำโคโลราโด	14
รูปที่ 2.10 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของ MIB และ Geosmin ใน State Project	16
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	23
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการติดตั้งระบบบำบัดด้วยโอโซน	24
รูปที่ 3.3 ถึงปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิริยาด้วยโอโซน	24
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบการผลิตโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซน	28
รูปที่ 4.2 ผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยโอโซน	29
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซน ที่พีเอชต่างๆ	30
รูปที่ 4.4 ผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	31
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์โดยการใช้โอโซนเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	32
รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์	33
รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์ฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อทำการบำบัดด้วยโอโซน	35
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อทำการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	37
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐาน โอโซน	47
รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์	51

	หน้า
รูปที่ ข-1 กราฟประสิทธิภาพเครื่องผลิตไอโซน	55
รูปที่ ข-2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์	58
รูปที่ ข-3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	58
รูปที่ ข-4 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสอง	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรม กลุ่ม อุตสาหกรรมผลิตกาวย เรซิน การผลิตเชื้อกระดาษ ปิโตรเคมี ฟอกหนัง สิ่งทอ การผลิตยาฆ่าเชื้อโรค และสารกันบูด (Oliveira *et al*, 2004; Glancer-Soljan *et al*, 2001) มีการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ทำให้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะมีการปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณสูง ตัวอย่างเช่น น้ำเสียจากโรงงานผลิตกาวยจะมีปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นสูงถึง 10 กรัมต่อลิตร (Oliveira *et al*, 2004) ฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะไปทำการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์พืชและสัตว์ ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบนิเวศเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ฟอร์มาลดีไฮด์สามารถระเหยสู่อากาศได้ง่ายทำให้เกิดมลพิษต่อบรรยากาศที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ และถ้ามีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณมากก็อาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ ในปัจจุบันมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมยอมให้มีปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำทิ้งที่มีฟอร์มาลดีไฮด์เจือปนก่อนทำการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสีย โดยทั่วไปใช้กระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ Catalytic wet oxidation , non -catalytic wet oxidation (Silva *et al*, 2003) การดูดซับ (Tanada *et al*, 1999) ระบบบำบัดทางชีวภาพ เช่น upflow anaerobic sludge blanket (UASB) (Vidal *et al*, 1999) Anaerobic fluidized bed granular activated carbon (AFBQAC) (Moteleb *et al*, 2002) ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) (Eiroa *et al*, 2005) เป็นต้น กระบวนการโอโซนเป็นกระบวนการออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งใช้ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ (Acero *et al*, 2001) แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยโอโซนมีข้อจำกัด

ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยโอโซนและโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารออกซิไดซ์ทั้งสองในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ รวมทั้งปัจจัยที่มีผล และสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ โดยที่ผลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อนได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการใช้โอโซนเปรียบเทียบกับการใช้ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์
3. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อทำปฏิกิริยากับ โอโซนและ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียฟอร์มาลดีไฮด์สังเคราะห์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. สารออกซิไดซ์ที่ใช้ คือ โอโซน กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในการทดลองได้แก่เครื่องผลิตโอโซน รุ่น OZ-735 บริษัท Ozzon
4. ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด เท่ากับ 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที
5. พีเอชที่ใช้ในการบำบัด เท่ากับ 3, 5, 7, 9 และ 12
6. ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้บำบัด เท่ากับ 0, 60, 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำโดยโอโซนและ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวออกซิไดซ์ด้วยโอโซนและ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อนได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ฟอรั่มลดีไฮด์

สารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ หรือที่เรียกทั่วไปว่า ฟอรั่มาลีน เป็นสารละลายที่ประกอบด้วย ก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ ประมาณร้อยละ 37 โดยน้ำหนักในน้ำ และมีเมทานอลปนอยู่ประมาณ 10-15 % ลักษณะทั่วไปของฟอรั่มาลีนเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกาเวรีชิน การผลิตเชื้อกระดาษ ปิโตรเคมี ฟอกหนัง สิ่งทอ การผลิตยาฆ่าเชื้อโรค และสารกันบูด (Oliveira *et al*, 2004; Glancer-Soljan *et al*, 2001)

2.1.1 คุณสมบัติของฟอรั่มลดีไฮด์

ฟอรั่มลดีไฮด์มีคุณสมบัติทางเคมีดังตารางที่ 2.1

2.1.2 ผลของฟอรั่มลดีไฮด์ต่อมนุษย์

หากรับประทานเข้าไปในร่างกาย 22-200 มิลลิกรัมต่อวัน ติดต่อกัน 13 สัปดาห์จะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษได้อย่างชัดเจน แต่อาจจะระคายเคืองต่อระบบการย่อยอาหาร อาจทำให้เกิดอาเจียนหน้ามืดและ ถ้าได้รับเข้าไปในปริมาณมาก ๆ อาจทำให้ชักและตายได้

ถ้าได้รับเข้าไปโดยการหายใจเข้าไปอาจก่อให้เกิดอาการระคายเคืองของเยื่อหลอดทางเดินหายใจ มีผลให้เกิดหลอดลมอักเสบและหากสัมผัสทางผิวหนังอาจเกิดอาการแบบเฉียบพลัน โดยจะเกิดการผิวหนังอักเสบเป็นผื่นแดงได้และอาจเกิดอาการแบบเรื้อรังได้เช่นเดียวกัน และฟอรั่มลดีไฮด์ยังก่อให้เกิดความเป็นพิษเฉพาะด้านได้ คือ ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์และเกิดความผิดปกติในตัวอ่อนได้

2.1.3 ผลของฟอรั่มลดีไฮด์ต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (พรชัย และคณะ, 2541)

ถ้าฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำมีความเข้มข้นเกินกว่า 500 พีพีเอ็ม ขบวนการใช้ออกซิเจนทางชีวภาพของจุลินทรีย์และพืชน้ำ จะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ และที่ความเข้มข้นเท่ากับ 200 พีพีเอ็มทำให้ปลาในแหล่งน้ำตายหมด

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพเคมีของฟอร์มัลดีไฮด์

สมบัติ	ข้อมูล
น้ำหนักโมเลกุล	30.03 กรัม/โมล
สี	ไม่มีสี
สถานะ	ก๊าซ
จุดหลอมเหลว	-92 °C
จุดเดือด	-21 °C
ความหนาแน่น (20°C)	0.815 กรัมต่อมิลลิลิตร
เวลาครึ่งชีวิต	2 – 20 วัน
กลิ่น	กลิ่นฉุนแรง, ระคายเคือง
ความเข้มข้นที่ทำให้เกิดกลิ่น : น้ำ	50 พีพีเอ็ม
ความเข้มข้นที่ทำให้เกิดกลิ่น : อากาศ	0.5-1.0 พีพีเอ็ม
ความสามารถในการละลาย	มากกว่า 50%
น้ำบริสุทธิ์ (20°C)	
ตัวทำละลายอินทรีย์	อีเทอร์, อัลกอฮอล์, อะซีโตน, เบนซีน
สัมประสิทธิ์การแพร่ : Log K _{ow}	0.350
Log K _{oc}	1.567
ความดันไอ (25°C)	Gas: vapor pressure >bp; 3,883 mm Hg
ค่าคงที่เฮนรี (25°C)	3.27 x 10 ⁻³ atm-m ³ /mol
จุดวาบไฟ	60 °C
TLV	0.3 พีพีเอ็ม
IDLH	30 พีพีเอ็ม
TLV-TWA	0.75 พีพีเอ็ม
TLV-STEL	2 พีพีเอ็ม
LD ₅₀ (ได้รับทางปากของหนูทดลอง)	100 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไอโซน

2.2.1 คุณสมบัติของไอโซน

ไอโซนเป็นก๊าซสีน้ำเงินอ่อน แต่เมื่ออยู่ในสถานะ ของเหลวจะมีสีม่วงเข้ม และระเหิดง่าย กลิ่นฉุนคล้ายกระเทียม สำหรับคุณสมบัติอื่น ๆ ที่สำคัญแสดงในตารางที่ 2.2 (Gary, 1982)

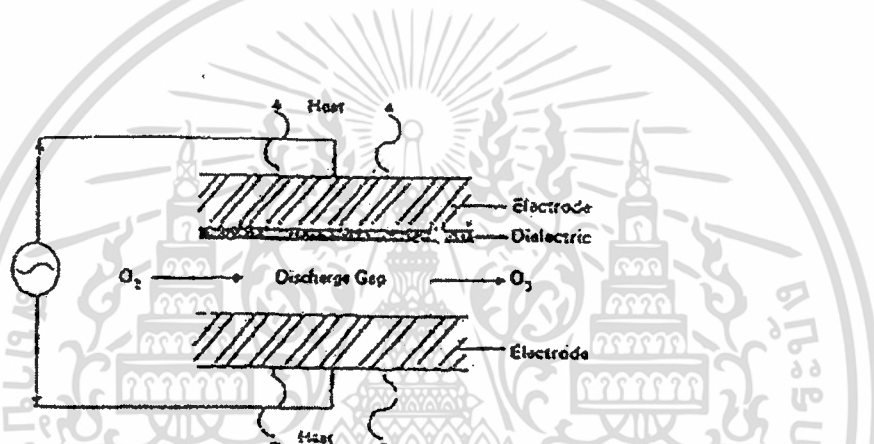
ตารางที่ 2.2 สมบัติกายภาพของไอโซน

คุณสมบัติ	ข้อมูล
น้ำหนักโมเลกุล	48.0
จุดเดือด (ที่ความดันบรรยากาศ 760 torr)	-111.9 °C
จุดหลอมเหลว (ที่ความดันบรรยากาศ 760 torr)	-192.7 ± 0.2 °C
อุณหภูมิวิกฤต	-12.1 °C
ความดันวิกฤต	54.6 บรรยากาศ
ปริมาตรวิกฤต	0.147 ลิตร/โมล
ความหนาแน่นวิกฤต	0.437 กรัม/ลบ.ซม
ความหนาแน่น (ก๊าซ 0 °C)	2.144 กรัม/ลิตร
ความหนาแน่น (ของเหลว -183 °C)	1.57 กรัม/ลบ.ซม
ความตึงผิว (-183 °C)	38.4 ± 0.7 dynes/cm
ความหนืด (ของเหลว -183 °C)	1.55 ± 0.22 cp
เวลาครึ่งชีวิต	15 นาที
เอนทัลปีของการระเหย	75.6 แคลอรี/กรัม (-122 °C)
การดูดกลืนรังสีUV	ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร
IDLH	75 พีพีเอ็ม
TLV (light work)	0.1 พีพีเอ็ม
TLV-TWA	1 พีพีเอ็ม
LD ₅₀ (รับทางปากของหนูทดลอง)	376 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การผลิตโอโซน

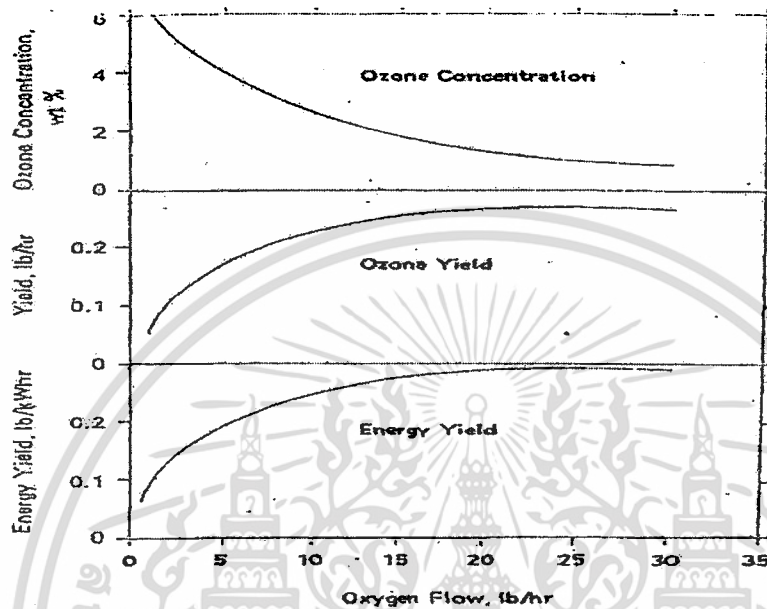
โอโซนเป็นสารเคมีที่ไม่เสถียร มันสามารถสลายตัวกลายเป็นก๊าซออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่ถูกผลิตขึ้น ซึ่งโอโซนจะมีค่าครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 15 นาที ดังนั้นในการใช้งาน โอโซนจึงต้องผลิตแล้วใช้งานทันที วิธีผลิตโอโซนที่ใช้ในปัจจุบัน คือ การใช้ electrical corona discharge ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการผลิตโอโซน โดยใช้ corona discharge ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยการย่อยสลายโอโซนจะขึ้นกับความร้อน และความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะว่าอิเล็กตรอนภายในช่องว่างจะสัมผัสกับโมเลกุลของโอโซนมากพอกับที่สัมผัสกับ โมเลกุลของออกซิเจน ดังนั้นจะต้องทำการผ่านอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้โอโซนที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (ยูฟา, 2547)



รูปที่ 2.1 พื้นฐานในการผลิตโอโซน(ยูฟา, 2547)

เมื่อกระแสไฟฟ้ากระแสสลับผ่านช่องว่าง (discharge gap) ที่ประกอบด้วยก๊าซออกซิเจน โอโซนจะถูกผลิตขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยวิธีการนี้อาศัยความไม่มีประสิทธิภาพในตัวของออกซิเจนเอง โดยที่ 10% ของพลังงานทั้งหมดจะถูกใช้ในการสร้างโอโซน ส่วนพลังงานที่เหลือนั้นจะสูญเสียไปในรูปของแสง เสียง และความร้อน ถ้าความร้อนไม่สามารถถ่ายเทออกมาได้อย่างสะดวกแล้วจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในช่องว่างอาจทำให้ผิวของฉนวนสลายได้ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อใดจะทำให้โอโซนได้รับความร้อน และอาจสลายไปได้ในที่สุด

ปริมาณของ โอโซนที่เครื่องผลิตโอโซนผลิตขึ้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านฉนวนและอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เข้าสู่เครื่องผลิตโอโซน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 อัตราการไหลของออกซิเจนที่มีต่อพลังงานที่ใช้ และความเข้มข้นของโอโซน (Evan, 1997)

2.2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซโอโซน มีดังนี้

1. ปริมาณของอากาศแห้ง ถ้ามีปริมาณสูงปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จะสูงขึ้น
2. อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน ถ้าอัตราการไหลเข้าของอากาศที่ผ่านเข้าเครื่องผลิตโอโซนมาก ความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้จะต่ำ เนื่องจากมีปริมาณของอากาศมากก๊าซออกซิเจนที่ผ่านเข้ามาในเครื่องไม่ถูกผลิตเป็นก๊าซโอโซน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

2.2.3 จลนศาสตร์ของโอโซนในน้ำ

การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนด้วยกัน 2 แบบ คือ

2.2.3.1 Direct oxidation เป็นปฏิกิริยาทางตรง ซึ่งเป็นกลไกที่ออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (Nassen Oxygen) ที่แตกตัวจากโอโซนเข้าไปออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์โดยตรงโดยกลไกการทำปฏิกิริยาแบบนี้จะมีความเฉพาะเจาะจงสูงและเกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากสารอินทรีย์ที่โอโซนสามารถออกซิไดซ์ได้นั้นจะต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันครึ่งปฏิกิริยาน้อยกว่าโอโซน

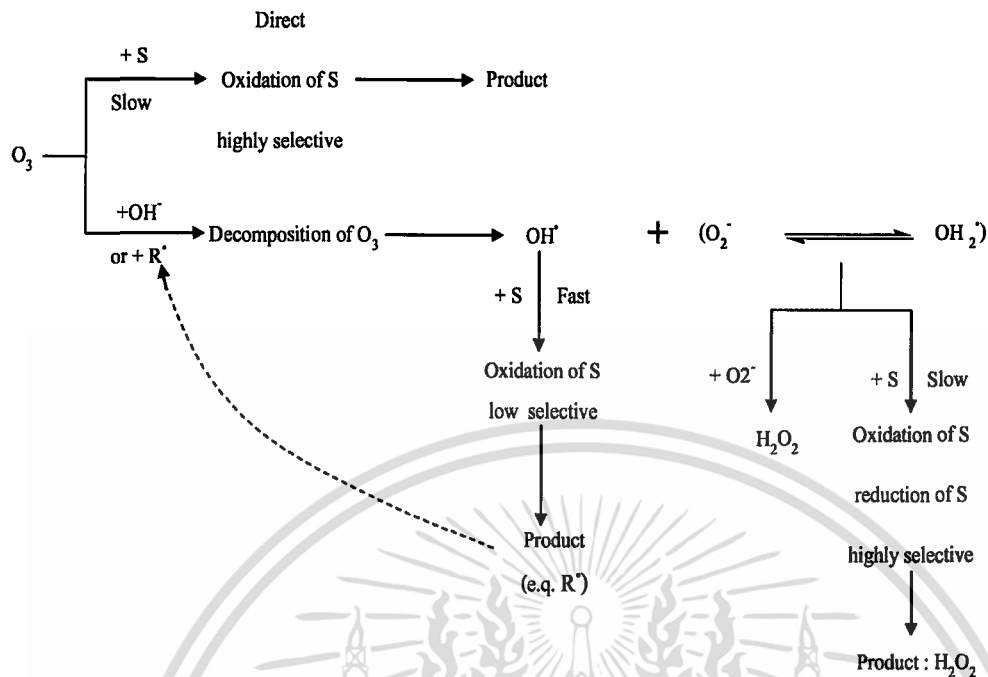
2.2.3.2 Autodecomposition เป็นปฏิกิริยาทางอ้อมโดยออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (Nassen Oxygen) จะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออน ทำให้เกิดไฮดรอกซิล แรดิคัล ไปทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยปฏิกิริยานี้จะไม่มีเฉพาะเจาะจงและปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็ว มีประสิทธิภาพสูงกว่าปฏิกิริยาในทางตรงในการกำจัดสารอินทรีย์ เพราะเมื่อไฮดรอกซิล แรดิคัลไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะได้ผลพลอยได้เป็นแรดิคัลของสารอินทรีย์ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ตัวอื่นได้ต่อไป ในรูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและสารตั้งต้นโดยที่สารอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์อะลิฟาติก, อัลดีไฮด์, คีโตน และ พวกออะโรมาติกที่ไม่ว่องไวจะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆกับโมเลกุลของโอโซนและโอกาสที่จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ (Free radical) สูง

คุณสมบัติของโอโซนสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาย่อยสลายของโอโซนดังนี้

(www.lenntech.com, 18/03/49)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ปฏิกริยากับสารตั้งต้นกับ โอโซน และปฏิกริยาการย่อยสลาย โอโซน (Chiraphom, 1998)

โดยที่ปฏิกริยาการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ด้วย โอโซนจะเป็นปฏิกริยาแบบตรงหรือแบบโดยอ้อมนั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย

2.3 จลนพลศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics)

2.3.1 ปฏิกริยาอันดับศูนย์ (Zero-Order Reaction)

มีหลายๆ ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาทางชีวภาพ อาจแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงกับความเข้มข้น แสดงให้เห็นว่า อัตราการเกิดปฏิกริยา ไม่ได้ขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสาร ปฏิกริยาประเภทนี้เรียกว่า ปฏิกริยาอันดับศูนย์

ตัวอย่างเช่น การออกซิเดชันของแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ ปฏิกริยาประเภทนี้ อัตราการเกิดจะช้าลงเมื่อความเข้มข้นของสารเข้าใกล้ศูนย์

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกริยา} = \frac{-dc}{dt} = k$$

เครื่องหมายลบแสดงถึง การสลายหรือลดปริมาณสารตั้งต้นลงขณะเกิดปฏิกริยา ค่า k เป็นค่าคงที่ของการเกิดปฏิกริยา

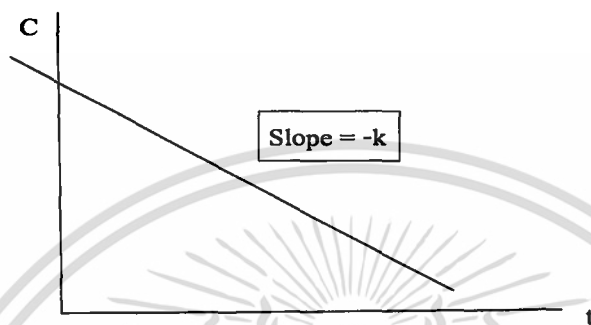
$$dc = -kdt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทิเกรต จะได้

$$\begin{aligned} dc &= -kdt \\ C_t - C_0 &= -kt + \text{ค่าคงที่} \\ C_t &= C_0 - kt \end{aligned} \quad (2.6)$$

สามารถเขียนกราฟแสดงการสลายสาร ได้ดังภาพ



รูปที่ 2.4 รูปแสดงการย่อยสลายสารแบบปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ในกรณีสารกัมมันตรังสี การหาค่าครึ่งชีวิต (Half-Life, $t_{1/2}$) ของสารซึ่งได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการลดปริมาณสารจนเหลือครึ่งหนึ่ง ($C_t = \frac{1}{2} C_0$) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสารตั้งต้น (C_0) สามารถหาได้ดังนี้

แทนค่า ในสมการ จะได้

$$C_t = \frac{C_0}{2} \quad t_{1/2} = \frac{C_0}{2k} \quad (2.7)$$

2.3.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First – Order Reaction)

การสลายสาร ในรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{-dc}{dt} &= kc \\ \text{ปรับสมการได้ดังนี้} \quad \frac{dc}{C} &= -kdt \end{aligned}$$

อินทิเกรต จะได้

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{1}{C} dc = - \int_{C_0}^{C_t} kdt$$

$$\ln C_t - \ln C_0 = -kt$$

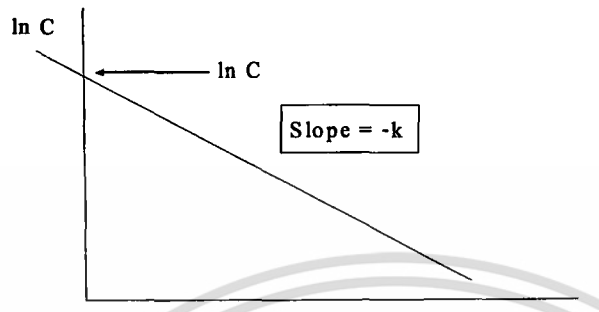
$$\ln C_t = \ln C_0 - kt$$

หรือ

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่า ถ้าทำการพล็อตกราฟโดยให้ แกน X เป็นเวลาของการเกิดปฏิกิริยา (t) และแกน Y เป็นค่า $\ln C_t$ สำหรับปฏิกิริยาที่เป็นอันดับหนึ่งจะแสดงกราฟเส้นตรง โดยมีค่าความชันเท่ากับ $-k$ และตัดแกน Y ($\ln C_t$) ที่จุดหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับ $\ln C_0$ ดังภาพ



รูปที่ 2.5 รูปแสดงการย่อยสลายสารแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

วิธีการนี้เป็นทางหนึ่งในการทดสอบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งหรือไม่ ถ้าครึ่งชีวิตของสารสามารถหาได้โดยการแทนค่าสมการ C_t ด้วย $C_0/2$

$$\begin{aligned} \frac{C_0}{2} &= C_0 e^{-kt_{1/2}} \\ \ln \frac{1}{2} &= -k t_{1/2} \\ \ln 2 &= k t_{1/2} \\ t_{1/2} &= \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ในงานสิ่งแวดล้อมจะพบปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งจำนวนมาก เช่น อัตราการละลายของออกซิเจนในน้ำสภาวะหนึ่ง ๆ อัตราการตายของจุลินทรีย์จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค รวมทั้งอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ระหว่างการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.3.3 ปฏิกิริยาอันดับที่สอง (Second-Order Reaction)

ปฏิกิริยาอันดับที่สอง เป็นปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดสัมพันธ์กับค่ากำลังสองของความเข้มข้นของสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่ง หรือ สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองตัว

เช่น $A + B \rightarrow \text{product}$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A^2 \quad \text{หรือ} \quad \frac{-dC_B}{dt} = k C_B^2$$

กรณี $\frac{-dC_A}{dt} = k C_B^2$

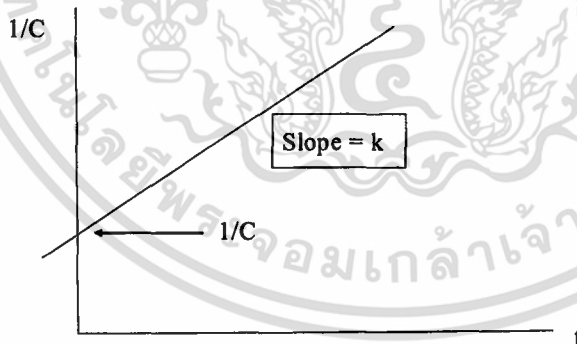
อินทิเกรต จะได้

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{dC}{C^2} = \int_0^t kt$$

$$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = -kt$$

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + kt \quad (2.10)$$

จากสมการ ถ้าพล็อตกราฟระหว่าง t (แกน X) และ $1/C_t$ (แกน y) จะได้กราฟเส้นตรงถ้าปฏิกิริยานั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ k และจุดตัดแกน Y, มีค่า $1/C_0$ ดังแสดงดังภาพ



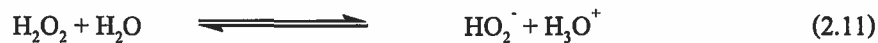
รูปที่ 2.6 รูปแสดงการย่อยสลายสารแบบปฏิกิริยาอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Advanced oxidation processes

Advanced oxidation processes เป็นกระบวนการที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) เป็นตัวกระตุ้นให้โอโซนเกิดการสลายตัวในน้ำ เพื่อทำให้เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์

การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นกรดอ่อนเมื่อไปรวมตัวกับน้ำจะแตกตัวเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ไอออน (hydroperoxide ion) ดังสมการที่ 2.6



โมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับโอโซนจำนวนมาก ขณะที่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (HO_2^-) จะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้อัตราการย่อยสลายของโอโซนโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อ pH เพิ่มขึ้น และถ้าเพิ่มค่า pH ขึ้น ความเข้มข้นของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (HO_2^-) จะแสดงออกมาเป็นฟังก์ชันกับค่า K_a และสัมประสิทธิ์การแตกตัว (dissociation coefficient ; α) ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนี้

$$K_a = \frac{[\text{HO}_2^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_2\text{O}_2]} \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{[\text{HO}_2^-]}{[\text{H}_2\text{O}_2] + [\text{HO}_2^-]} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$\text{pH} \ll \text{p}K_a$$

$$[\text{H}_2\text{O}_2]_t = [\text{H}_2\text{O}_2] + [\text{HO}_2^-] \approx [\text{H}_2\text{O}_2]$$

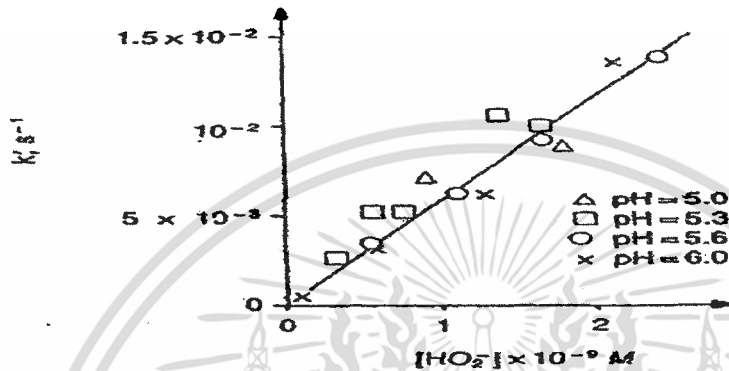
$$K_a = \alpha [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$\log \alpha = \text{p}K_a - \text{pH}$$

เมื่อทราบความเข้มข้นของ HO_2^- อัตราการย่อยสลายของโอโซนที่อันดับปฏิกิริยาแรกของโอโซนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้น $[\text{HO}_2^-]$ แสดงโดยใช้ค่าคงที่จลนศาสตร์ (kinetic constant : k') ตามแบบสมการจลนศาสตร์ จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{-d[O_3]}{dt} = k'[O_3] \quad (2.14)$$

เมื่อ k' = Pseudo first – order rate constant ของการย่อยสลายโอโซนด้วย H_2O_2



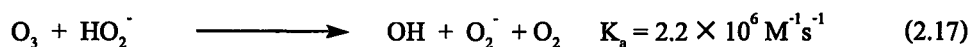
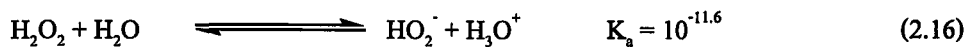
รูปที่ 2.7 การหา Pseudo first – order ของการย่อยสลายโอโซนโดยแปรค่าความเข้มข้นของ HO_2^- (methyl mercury = 1.5 mM, $[PO_4]_t = 50$ mM)

เมื่อเขียนในรูปของ overall kinetic equation จะเป็นดังนี้

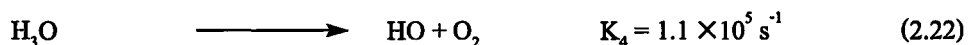
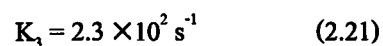
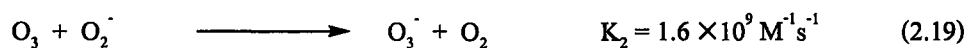
$$\frac{-d[O_3]}{dt} = k''[O_3][HO_2^-] \quad (2.15)$$

เมื่อ k'' = second – order rate constant ของการย่อยสลายโอโซนด้วย H_2O_2

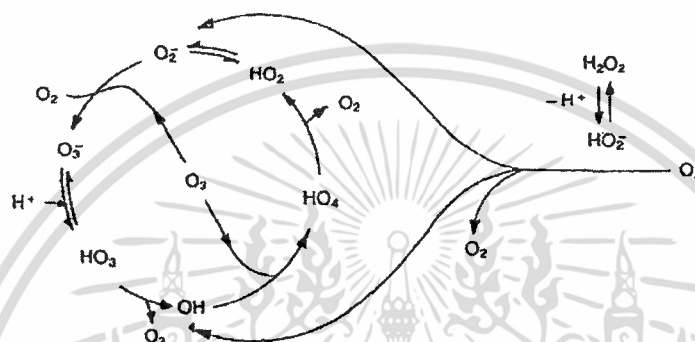
ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ($k'' = 5.5 \pm 1.0 \times 10^6 M^{-1}s^{-1}$) มีค่ามาก จึงเชื่อว่าการย่อยสลายโอโซนจะเริ่มต้นโดยไฮดรอกซิล ไอออน ดังนั้นจึงทำให้ความเข้มข้นของ HO_2^- ต่ำ กลไกการย่อยสลายโอโซน การเริ่มและการแพร่ของปฏิกิริยา จะสามารถเขียนได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดังแสดงไว้ในรูป 2.5

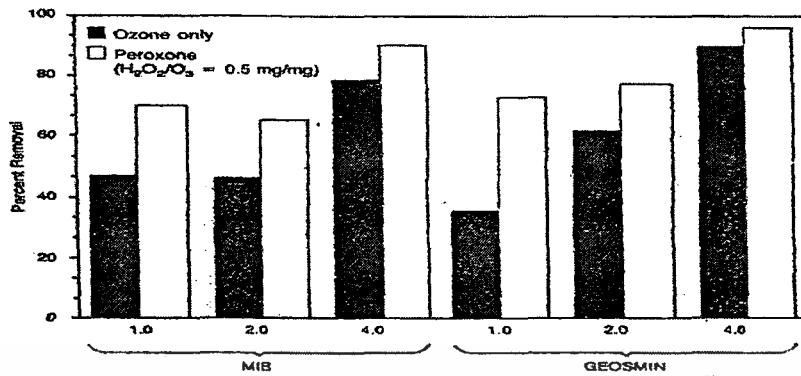


รูปที่ 2.8 กระบวนการย่อยสลายโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไอออน

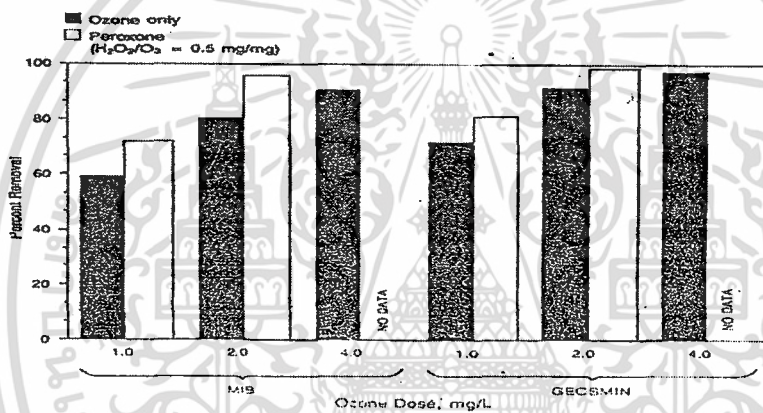
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไอออน (HO₂⁻) จะถูกใช้โดยโอโซนและจะถูกแทนที่ด้วยปฏิกิริยาระหว่าง H₂O₂ และ H₂O อัตราการใช้ HO₂⁻ โดยโอโซนจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{-d[\text{H}_2\text{O}_2]}{dt} = k[\text{H}_2\text{O}_2][\text{O}_3] \quad (2.23)$$

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยกระทำในน้ำธรรมชาติที่มี geosmin และ Methyisobomeol (MIB) เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลของการออกซิเดชันโดยโอโซนเพียงอย่างเดียวและการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงดังรูป 2.9 และ รูป 2.10



รูปที่ 2.9 เปรอ์เซ็นต์การกำจัดของ Methyisoborneol (MIB) และ Geosmin ในแม่น้ำโคโลราโด (ศิริลักษณ์ และคณะ, 2544)



รูปที่ 2.10 เปรอ์เซ็นต์การกำจัดของ Methyisoborneol (MIB) และ Geosmin ใน State Project (ศิริลักษณ์ และคณะ, 2544)

การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเพิ่มการกำจัด geosmin และ Methyisoborneol (MIB) 35% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว จากการช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดของรสและกลิ่นของการใช้ advanced oxidation processes (O_3/H_2O_2) อธิบายได้ว่า พฤติกรรมของ initiator (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์) จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายโอโซนในน้ำ ทั้งนี้อัตราการสร้าง ไฮดรอกซิล แรดิคัล สูงขึ้นเมื่อน้ำมีความเข้มข้นของ HCO_3^- และ CO_3^{2-} ต่ำ (Bruno *et al* , 1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟอร์มัลดีไฮด์

ฟอร์มัลดีไฮด์เมื่อทำปฏิกิริยากับโอโซนซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (E^0) เท่ากับ 2.07 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ฟอร์มัลดีไฮด์จะถูกโอโซนออกซิไดซ์ และสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20 (ยูพา, 2547)



ปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งถูกออกซิไดซ์โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (www.h2o2.com, 18/03/49)

- ที่สภาวะกรด



- ที่สภาวะเบส



กระบวนการ Advanced oxidation ของฟอร์มัลดีไฮด์ ทำการออกซิไดซ์ฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปฏิกิริยาจะเกิดดังสมการที่ 2.25 และ 2.26 จากสมการ พบว่าสารที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ฟอร์มัลดีไฮด์ ได้แก่ ไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^\cdot) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์ออกซิไดซ์ได้ดีกว่าโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังแสดงด้วยค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (E^0) ในตารางที่ 2.3

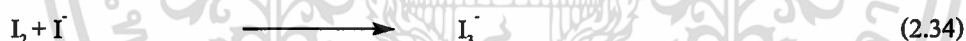


ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (E^0) ของตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ O_3 , OH^{\cdot} และ H_2O_2 (บุพา, 2547)

ตัวออกซิไดซ์	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (E^0)
โอโซน (O_3)	2.07
ไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^{\cdot})	2.86
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)	1.78

2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณโอโซน

การวิเคราะห์หาปริมาณโอโซน อาศัยหลักการทดสอบการดูดกลืนแสงของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยผ่านโอโซนลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ใช้ในการดักจับโอโซน ซึ่งควบคุมเพื่อให้อยู่ในช่วง 6.8 ± 0.2 โดยสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต จะทำให้เกิดไอโอดีนและแตกตัวให้อิโอด์ (I^-) และเมื่อปริมาณไอโอไดด์มีมากเกินไป ไอโอไดด์จะไปทำปฏิกิริยากับไอโอดีน (I_2) เกิดเป็นไตรไอโอไดด์ไอออน (I_3^-) ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร โดยสามารถเขียนสมการของการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้



ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานทำโดยการใช้สารละลายสต็อกไอโอดีน (I_2) ทำปฏิกิริยากับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ดังสมการ 2.34 (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์โอโซน ภาคผนวก ก-1)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุโขทัย และ อุบลวรรณ (2542)

ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการนำน้ำเสียจากการสังเคราะห์โดยการนำน้ำมันหล่อลื่น 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายดีเทอร์เจนต์ (LAS) 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 300 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น และทำการบำบัดด้วยโอโซนอย่างเดี่ยวและการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการแปรค่าพีเอช เป็น 4, 7, 9, พบว่าที่ pH 9 มีประสิทธิภาพที่สุด ระยะเวลาเป็น 0.5, 1.0, 1.5 ชั่วโมง พบว่าถ้าระยะเวลาานานประสิทธิภาพการบำบัดค่า ซีโอดี บีโอดี และปริมาณน้ำมันและไขมันจะมีค่าสูงขึ้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.025, 0.05, 0.1, 0.15 มิลลิลิตร พบว่าถ้าใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีประสิทธิภาพการบำบัดในทุกๆพารามิเตอร์มีแนวโน้มสูงขึ้น

กนกวรรณ และ สราวุธ (2543)

ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดปริมาณการตกค้างของสารฆ่าแมลงเมทาไมโดฟอสเฟสในผักคะน้า โดยการใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวี และออกซิเจน โดยการนำผักคะน้ามาหั่นและปั่นละเอียดเป็นเวลา 1 นาที และสกัดเอาเมทาไมโดฟอสเฟสในผักคะน้าออกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอชพีแอลซี และแปรค่าเวลาในการบำบัดเป็น 1 นาทีและ 10 นาที พบว่าการใช้ออกซิเจนในการบำบัดเมทาไมโดฟอสเฟสเป็น 7.60% และ 29.80% ตามลำดับ และการใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวีในการบำบัดเมทาไมโดฟอสเฟสเป็น 47.06% และ 62.99% ตามลำดับ

ศิริลักษณ์, สุภาพร และ เอกชัย (2544)

ศึกษาผลกระทบต่อวิตามินซี เมื่อมีการบำบัดสารพิษตกค้างในผัก โดยการออกซิไดซ์ ด้วย 3 เทคนิค คือ การใช้ ออกซิเจน, โอโซนเพียงอย่างเดียว และโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นเวลา 1 นาที และ 10 นาที โดยนำเอาผักมาปั่น 1 นาที และทำการสกัดสารพิษที่ตกค้างในผักไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์พบว่าเมื่อออกซิไดซ์สารพิษตกค้างในผักด้วยออกซิเจน 1 นาที และ 10 นาที พบว่าเมื่อออกซิไดซ์สารพิษตกค้างด้วยออกซิเจน 1 นาที และ 10 นาที ทำให้ปริมาณวิตามินซีลดลง 33.91% 28.41% ตามลำดับ การออกซิไดซ์สารพิษตกค้างด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว 1 นาที ปริมาณวิตามินซีจะลดลง 27.73% และ 10 นาที ปริมาณวิตามินซีจะเพิ่มขึ้น 20.65% ถ้าออกซิไดซ์สารพิษตกค้างด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1 นาที และ 10 นาที ปริมาณ วิตามินซีจะเพิ่มขึ้น 7.16 และ 40.79% ตามลำดับ

Oliveira และคณะ (2004)

ศึกษาประสิทธิภาพการลดการย่อยสลายฟอสฟอรัสในระบบบำบัดทางชีวภาพแบบ packed – bed ที่สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยการสังเคราะห์น้ำเสียตัวอย่างให้มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเป็น 26.2 , 85.3 , 175.9 , 394.0 , 597.7 , 808.0 , 989.2 และ 1158.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวระบบปรับปรุงเป็นทรงกระบอกยาวมีความยาว 1,000 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50.4 มิลลิเมตร มีปริมาตร 1,995 มิลลิเมตร ทำการป้อนน้ำเสียเข้าระบบบำบัด โดยมีระยะเวลาพักเก็บ เป็น 12 ± 0.5 ชั่วโมง อุณหภูมิเป็น 35 ± 1 องศาเซลเซียส จะเก็บตัวอย่างที่ 4, 8, 12 และ 16 มิลลิเมตร และนำไปจัดพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่าสามารถลดค่า COD ของน้ำเสียและ ฟอสฟอรัส ได้ถึง 99.7% และ 92 % ตามลำดับ

Kosaka และคณะ (2001)

ทำการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และใช้ทรายกรองในขั้นที่สอง พบว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว และการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถบำบัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ได้สูงสุด 50% และ 74% ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่สภาวะคือ ความเข้มข้นสารอินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 5.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโอโซนเท่ากับ 0.56 มิลลิโมล , พีเอชเท่ากับ 7, อัตราการไหลของโอโซนที่ 0.501 ลิตรต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่ 10, 20, 30 และ 40 นาที และแปรค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 3 ระบบ คือ ระบบ D เท่ากับ 250, 200, 100 และ 50 ไมโครกรัมต่อโมล ระบบ I เท่ากับ 50, 100, 200 และ 250 ไมโครกรัมต่อโมล และระบบ C เท่ากับ 150 ไมโครโมล และการใช้ทรายกรอง ใช้บำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ที่ออกมาจากระบบการใช้โอโซนอย่างเดียวและการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าสามารถบำบัดได้สูงสุดเท่ากับ 22% และ 52% ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่สภาวะคือ ความเข้มข้นสารอินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 5.6 มิลลิกรัมต่อลิตร , ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาณโอโซนเท่ากับ 0.56 มิลลิโมล , พีเอชเท่ากับ 7, อัตราการไหลของโอโซนที่ 0.501 ลิตรต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่ 10, 20, 30 และ 40 นาที

EI – din และคณะ (2006)

ศึกษาประสิทธิภาพการออกซิไดซ์เรซินและกรดไขมันด้วยโอโซน ซึ่งความเข้มข้นของกรดที่ทำกรทดลองเข้มข้น 9 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการแปรค่าพีเอช ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ และอุณหภูมิ พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 8, 9 และ 11 และใช้ความเข้มข้นของโอโซน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถออกซิไดซ์ได้ เท่ากับ 50 %, 65 % และ 75 % ตามลำดับ และที่สภาวะความเข้มข้นของโอโซนเท่ากับ 8 มิลลิกรัมต่อลิตรและอุณหภูมิเท่ากับ 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส มีค่าการออกซิไดซ์เท่ากับ 40 %, 55 % และ 65 % ตามลำดับ และถ้าเพิ่มความเข้มข้นของโอโซน ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เรซินและกรดไขมันจะเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 65 เซนติเมตร
2. เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) รุ่น OZ-735 บริษัท Ozzon ประเทศไทย
3. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 6405 บริษัท Jenway ประเทศ อังกฤษ
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น D8 Advance บริษัท Denver instrument
5. ตู้อบ
6. เครื่องแก้วต่าง ๆ

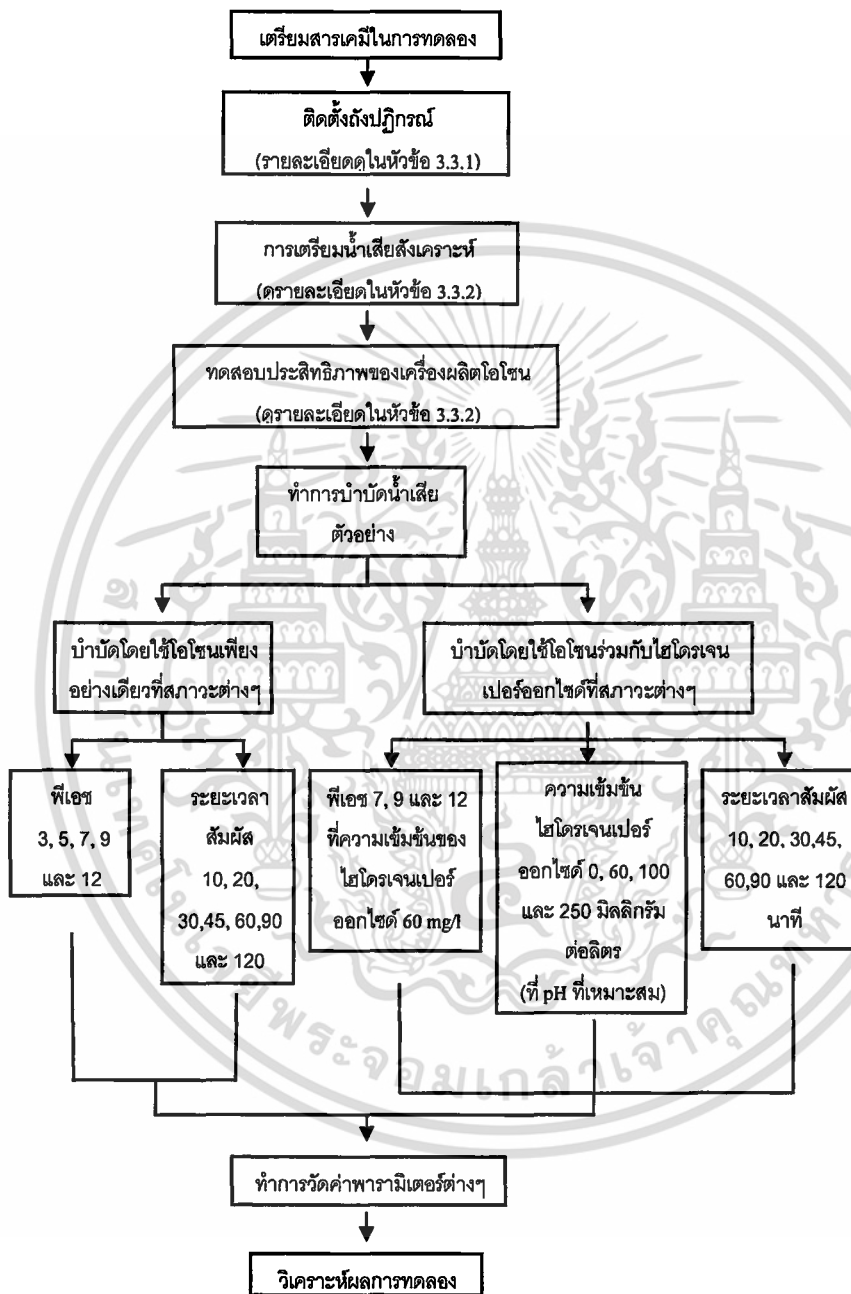
3.2 สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1% ในบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (1% KI) เกรดวิเคราะห์ บริษัท BDH Laboratory Supplies
2. สารละลายสต็อกไอโอดีน เกรดวิเคราะห์ บริษัท UNIVAR
3. สารละลายอะเซททิลอะซีโตน ($C_5H_8O_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Laboratory Rasayan
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท UNIVAR
5. สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท UNIVAR
6. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท LABSCAN
7. สารละลายไทมอลพทาลินอินดิเคเตอร์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท LABCHEM
8. สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยปริมาตร (CH_2O) บริษัท CARLO ERBA
9. สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 7
10. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักบริษัท CARLO ERBA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยเพื่อศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสด้วยโอโซน และโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1

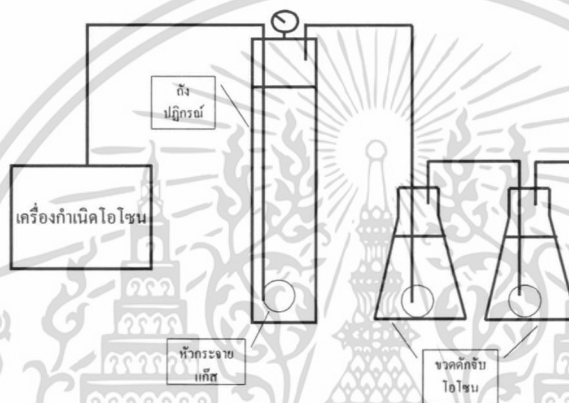


รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การติดตั้งถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิก สูง 65 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ปริมาตร 5 ลิตร ต่อเข้ากับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozzon รุ่น OZ-735) โดยต่อท่อนำก๊าซโอโซนเข้าทางด้านบนของถังและต่อเข้ากับหัวกระจายก๊าซ (Diffuser) ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านล่างของถัง ก๊าซโอโซนที่ไม่ละลายน้ำจะถูกดักจับด้วยขวดดักจับโอโซน (Ozone trap) ที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1% ในบัฟเฟอร์ฟอสเฟต โดยต่อแบบอนุกรม จำนวน 2 ขวด ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการติดตั้งระบบบำบัดด้วยโอโซน



รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาด้วยโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 40% โดยปริมาตร ซึ่งมีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ เท่ากับ 400,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเจือจางเป็น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปตมา 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด จากนั้นปีเปตสารละลายที่เตรียมแล้วมา 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้นี้มีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Oliveira *et al*, 2004) ซึ่งในการทดลองทุกครั้งได้ทำเตรียมและหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ที่ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3.3 การทดสอบการผลิตโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซน

1. ติดตั้งถึงปฏิกรณ์ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3
2. เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1% ในบัฟเฟอร์ฟอสเฟต ปริมาตร 4 ลิตร (ดูรายละเอียดการเตรียมสาร ภาคผนวก ก-1) และ ขวดดัก โอโซน ทั้ง 2 ขวด ขวดละ 1 ลิตร
3. เดินเครื่องผลิตโอโซน ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ที่เวลา 0, 10, 20, 30 และ 40 นาที
4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณโอโซน ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 352 นาโนเมตร
5. ทำการวิเคราะห์ปริมาณ โอโซนที่ผลิตได้ ด้วยเครื่องผลิต โอโซน(ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ โอโซน ภาคผนวก ก-1)

3.3.4 การศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยโอโซน

1. ติดตั้งระบบน้ำเสียสังเคราะห์ ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ซึ่งทำการแปรค่าพีเอชต่างๆ ได้แก่ 3, 5, 7, 9 และ 12
3. ทำการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซน โดยเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา สัมผัสต่างๆ ได้แก่ 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที
4. นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซน (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ ฟอร์มาลดีไฮด์ ภาคผนวก ก-2)

- เก็บตัวอย่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ในขวดดักไอโซน เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้นหลังทำปฏิกิริยากับไอโซน และถือว่าไอโอดีนที่เกิดสมมูลกับไอโซนที่ใช้ไป (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ไอโซน ภาคผนวก ก-1)

3.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ของไอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.3.5.1 ผลของพีเอช

- ติดตั้งระบบน้ำเสียสังเคราะห์ ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3
- ทำการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ที่ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และแปรค่าพีเอชต่างๆ ได้แก่ 7, 9 และ 12
- ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ได้แก่ 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที
- ทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ของการใช้ไอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่พีเอชต่างๆ กัน (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ ภาคผนวก ก-2)
- เก็บตัวอย่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ในขวดดักไอโซน เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้นหลังทำปฏิกิริยากับไอโซน และถือว่าไอโอดีนที่เกิดสมมูลกับไอโซนที่ใช้ไป (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ไอโซน ภาคผนวก ก-1)

3.3.5.2 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

- ติดตั้งระบบน้ำเสียสังเคราะห์ ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3
- แปรค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0, 60, 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ทำการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ โดยเลือกใช้พีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.5.1
- ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ได้แก่ 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที
- นำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยไอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ ภาคผนวก ก-2)
- เก็บตัวอย่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ในขวดดักไอโซน เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้นหลังทำปฏิกิริยากับไอโซน ซึ่งสมมูลกับปริมาณไอโซนที่ใช้ไป

3.3.6 การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างได้กำหนดพารามิเตอร์ และวิธีวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

พารามิเตอร์	เครื่องมือวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	-
ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์	เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	มันลิน, 2539
ปริมาณของไอโซน	เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	ศิริลักษณ์ และคณะ, 2544

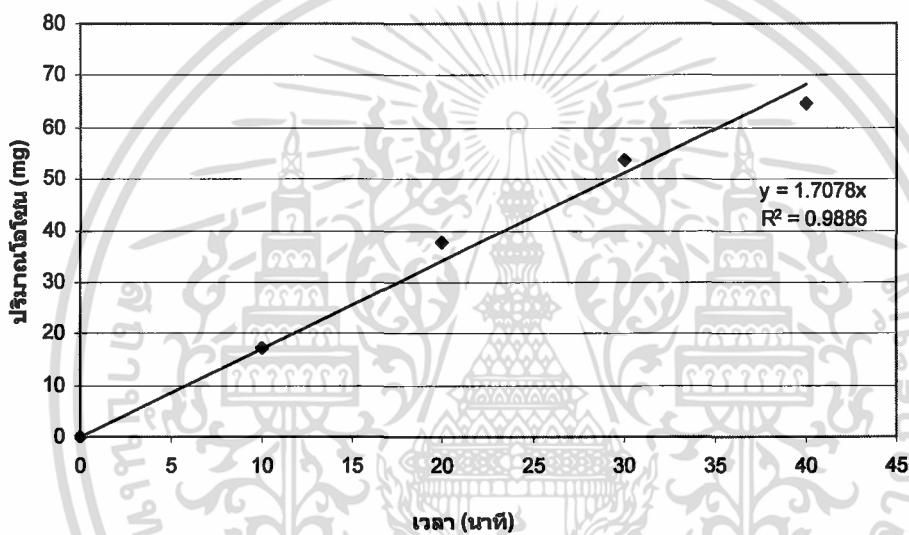
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 การทดสอบการผลิตโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซน

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซน โดยผ่านโอโซนลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 0, 10, 20, 30, และ 40 นาที ตามลำดับ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3 ภาคผนวก ข-1)

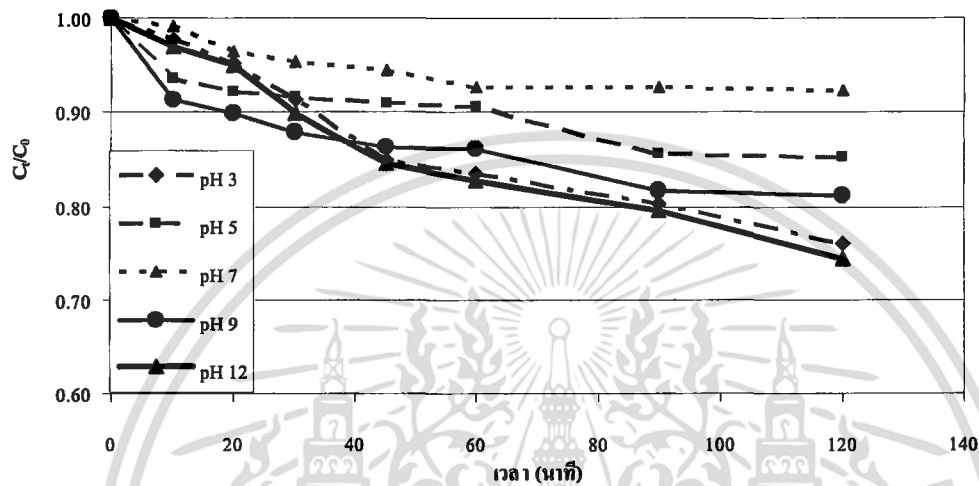


รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบการผลิตโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซน

จากรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์กับเวลา โดยความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง $y = 1.708 X$ ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถคำนวณหาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซนได้เท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

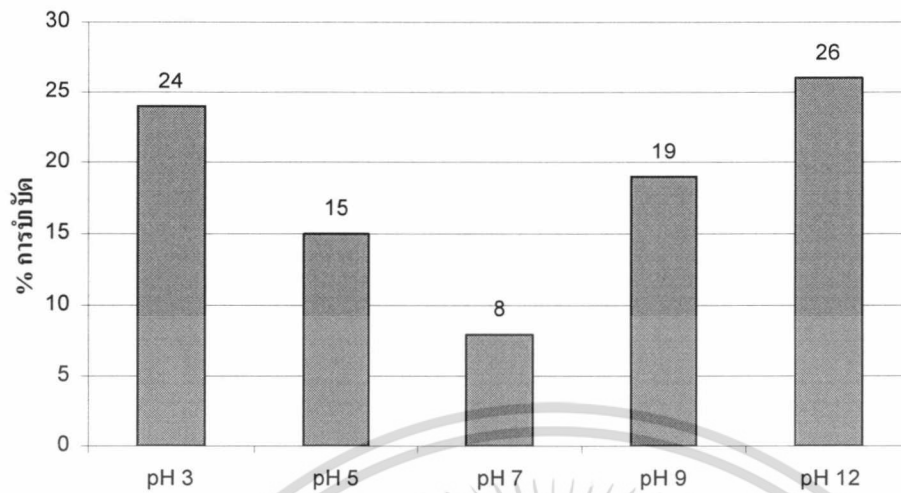
4.2 ผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซน

ในการศึกษาการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งมีปริมาณ โอโซนที่ให้กับระบบ เท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยจะทำการแปรค่าพีเอชต่างๆ ได้แก่ 3 , 5 , 7 , 9 และ 12 ตามลำดับ จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยโอโซน

จากรูปที่ 4.2 ผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 3 และ 12 มีประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีกว่าพีเอช 5, 7 และ 9 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการบำบัดด้วยโอโซนนั้น สามารถแยกการบำบัดออกได้เป็น 2 ส่วนคือ สภาวะเป็นกรด คือ ที่พีเอช เท่ากับ 3 โอโซนจะเกิดปฏิกิริยาแบบ direct oxidation ซึ่งโอโซนจะเข้าไปทำการออกซิไดซ์ ฟอร์มาลดีไฮด์โดยตรง ดังสมการที่ 2.26 ส่วนที่สภาวะที่เป็นเบส คือ ที่พีเอช เท่ากับ 12 โอโซนจะเกิดปฏิกิริยา Auto decomposition ทำให้ไฮดรอกซิล ไอออน (OH^-) ที่มีอยู่ในน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^\cdot) ซึ่งไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^\cdot) นั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (E°) มากกว่าโอโซนทำให้เกิดการออกซิไดซ์ฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดียิ่งขึ้น ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.3 และตารางที่ 2.3 (ยูพา, 2547) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ El-Din และคณะ (2006)



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซน ที่พีเอชต่างๆ

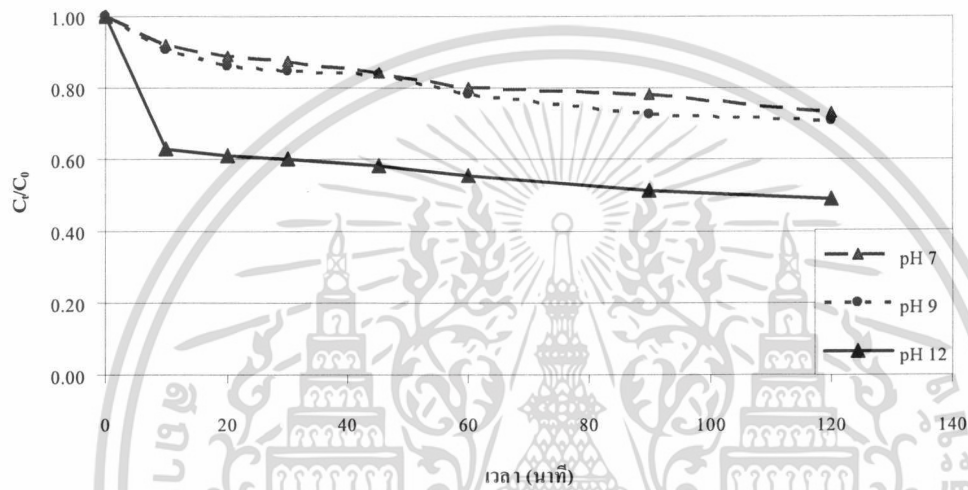
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าที่พีเอชเท่ากับ 3 และ 12 นั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ เท่ากับ 24% และ 26% ซึ่งถือว่าประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ แต่จากการพิจารณาหลักการปริมาณสารสัมพันธ์ ที่ พีเอช เท่ากับ 3 และ 12 อัตราการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซนกับฟอร์มาลดีไฮด์ มีสัดส่วนเท่ากับ 2.1 : 1 โดยโมล แต่ในทางทฤษฎีปริมาณของโอโซนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ จะเป็นสัดส่วนเท่ากับ 2 : 1 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง การที่ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทดลองมากกว่าทฤษฎีอาจเนื่องมาจากโอโซนเกิดการสลายตัวเป็นออกซิเจนก่อนการเกิดปฏิกิริยา (ยูพา, 2547) และสาเหตุที่การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์โดยการใช้โอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 20 กว่าเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากระยะเวลาที่ต้องใช้ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตรนั้นจากการคำนวณตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์พบว่าจะต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่นานกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

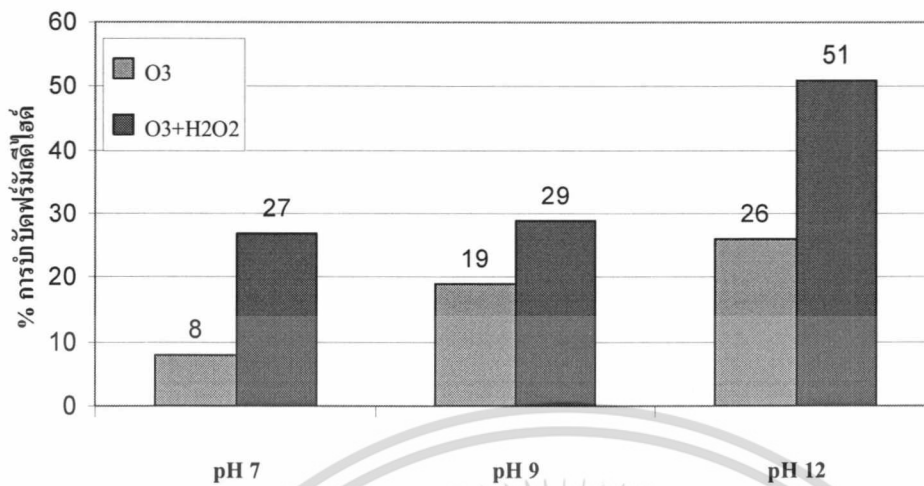
4.3.1 ผลของพีเอช

จากการศึกษาผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นคงที่ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการแปรค่าพีเอชต่างๆ ได้แก่ 7, 9 และ 12 จะได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากรูปที่ 4.4 พบว่าที่พีเอช เท่ากับ 12 ซึ่งมีสถานะเป็นเบสแก่ ปริมาณของความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ จะลดลงเท่ากับ 50.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 51% ซึ่งปริมาณการลดลงของความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์จะลดลงมากกว่าที่พีเอช 7 และ 9 เนื่องจากว่าในสถานะที่เป็นเบสสูง ๆ เมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วจะเกิดแตกตัวเป็นไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^\cdot) ได้มาก ทำให้ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^\cdot) ออกซิไดซ์ได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kosaka และคณะ (2001)



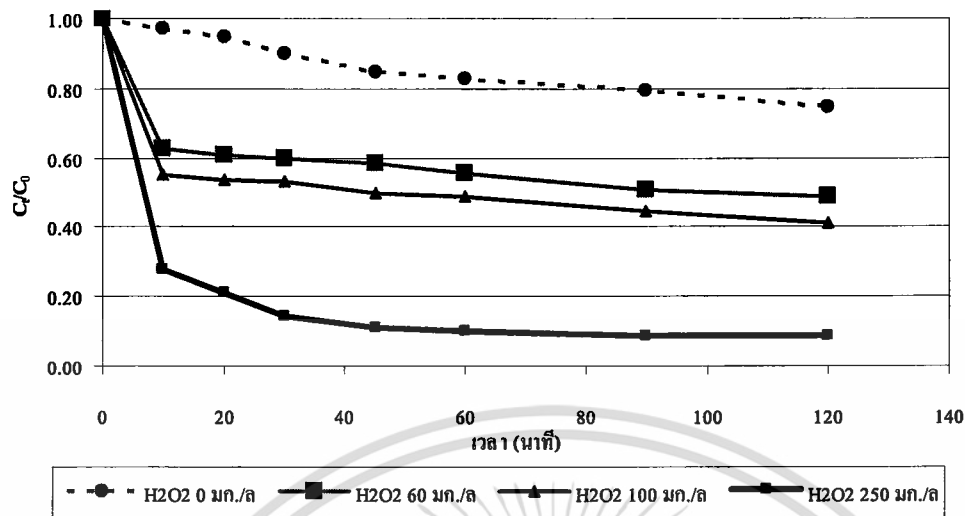
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้โอโซนเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซน และ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนนั้นมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับโอโซนแล้วจะแตกตัวเกิดเป็นไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^{\cdot}) ได้มากจึงทำให้ ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^{\cdot}) ออกซิไดซ์ได้เพิ่มมากขึ้น

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาผลความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับโอโซน โดยกำหนดพีเอชที่ 12 และทำการแปรค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 0 , 60 , 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ (พีเอชเท่ากับ 12)

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนได้ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์สูงกว่าที่ความเข้มข้น 0, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้เท่ากับ 89.5 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดได้เท่ากับ 91% ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า ถ้ามีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาก ก็จะทำให้แตกตัวเป็นไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^\cdot) ได้มาก ดังสมการที่ 2.30 (Mitani *et al.*, 2002) และเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความสามารถในการออกซิไดซ์ฟอร์มาลดีไฮด์ได้ ดังสมการที่ 2.27 - 2.29 ดังนั้นการเพิ่มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ย่อมเป็นการเพิ่มไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^\cdot) และความสามารถในการออกซิไดซ์ฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นผลทำให้สามารถลดฟอร์มาลดีไฮด์ได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kosaka และคณะ (2001)

4.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ

4.4.1 การบำบัดด้วยโอโซน

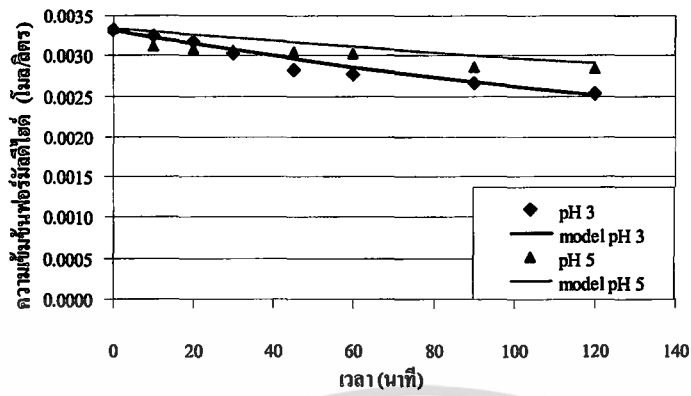
ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ได้ทำการกำหนดให้ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นคงที่ไว้ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณ โอโซนที่ผ่านเข้าระบบบำบัดมีปริมาณเท่ากัน

จากการศึกษา พบว่าการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อทำปฏิกิริยากับ โอโซนที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 นั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งอัตราการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ยกกำลังสอง โดยช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจึงทำให้ปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อระยะเวลาผ่านไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเริ่มคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.7 และสามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ ดังสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

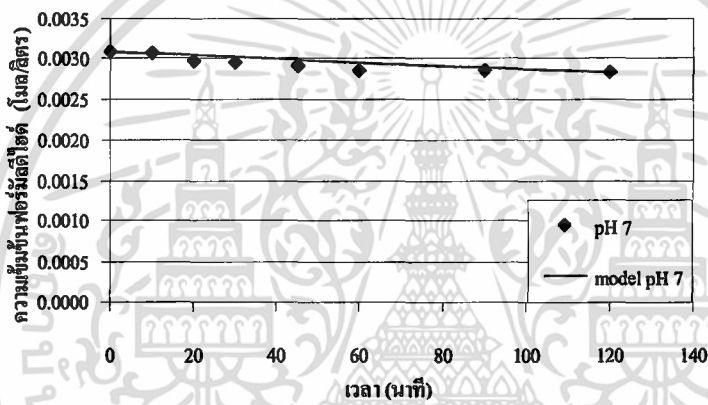
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับ โอโซน

สภาวะ	อันดับปฏิกิริยา	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) (ลิตรต่อโมล-นาทีก)	R ²	สมการ
พีเอช 3	สอง	0.8091	0.9599	$C_t = C_0 / (1 + C_0 kt)$
พีเอช 5	สอง	0.3698	0.8545	$C_t = C_0 / (1 + C_0 kt)$
พีเอช 7	สอง	0.2258	0.7985	$C_t = C_0 / (1 + C_0 kt)$
พีเอช 9	สอง	0.5074	0.8290	$C_t = C_0 / (1 + C_0 kt)$
พีเอช 12	สอง	0.8609	0.9681	$C_t = C_0 / (1 + C_0 kt)$

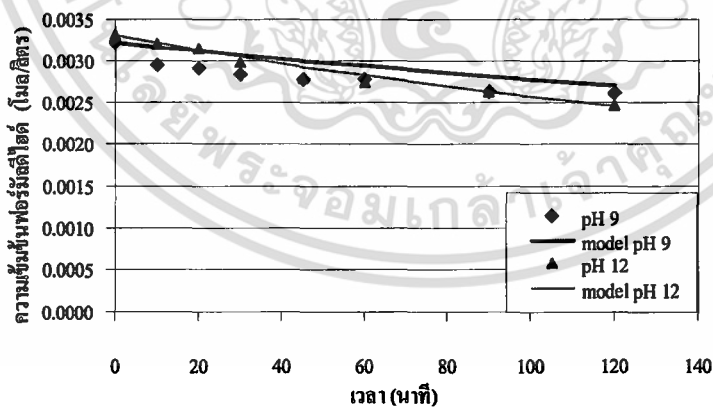
จากตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ที่ 3 และ 12 มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมากกว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) ของพีเอช 5, 7 และ 9 แสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนต่อฟอร์มาลดีไฮด์ที่พีเอช 3 และ 12 เกิดได้ดีกว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 โดยความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เวลาใด (C_t) สามารถคำนวณได้จากสมการ โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) ของแต่ละสภาวะแสดงดังตารางที่ 4.1



(ก) สภาวะเป็นกรด พีเอช เท่ากับ 3 และ 5



(ข) สภาวะเป็นกลาง พีเอช เท่ากับ 7



(ค) สภาวะเป็นเบส พีเอช เท่ากับ 9 และ 12

รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวของฟอร์มัลดีไฮด์เมื่อทำการบำบัดด้วยโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ได้ทำการกำหนดให้ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นคงที่ไว้ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโอโซนที่ผ่านเข้าระบบบำบัดมีปริมาณเท่ากัน และทำการแปรค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 0, 60, 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการศึกษา พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟอร์มาลดีไฮด์กับ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วง 10 นาทีแรก และหลังจาก 10 นาทีเป็นต้นไป

ในช่วง 10 นาทีแรก พบว่าการเพิ่มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการลดลงของฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งถ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากจะทำให้ฟอร์มาลดีไฮด์ลดลงได้มาก แต่เนื่องจากไม่ได้ทำการเก็บข้อมูลโดยละเอียดในช่วง 10 นาทีแรก จึงไม่สามารถทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ในช่วง 10 นาทีแรกได้

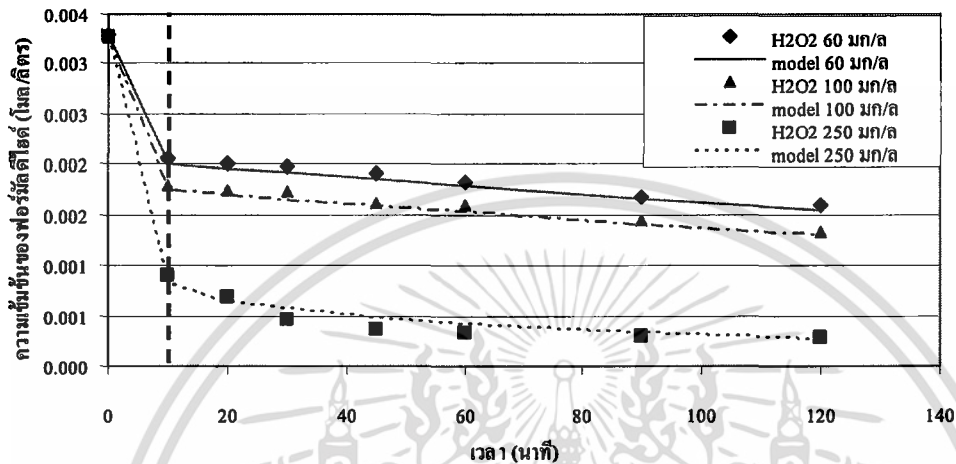
ในช่วงหลังจาก 10 นาที จากการวิเคราะห์โดยใช้ค่าความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลืออยู่ที่ นาทีที่ 10 เป็นความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น อัตราการลดลงของปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์มีแนวโน้มในการทำงานเดียวกัน โดยอันดับการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบ Pseudo - first order ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ฟอร์มาลดีไฮด์กับ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สภาวะ	อันดับปฏิกิริยา	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) (โมลต่อลิตร-นาที)	R^2	สมการ
H ₂ O ₂ 60 มก./ล	pseudo-first order	1.3333	0.9908	$C_t = C_0 e^{-k[H_2O_2]t}$
H ₂ O ₂ 100 มก./ล	pseudo-first order	0.9180	0.9924	$C_t = C_0 e^{-k[H_2O_2]t}$
H ₂ O ₂ 250 มก./ล	pseudo-first order	1.3240	0.7483	$C_t = C_0 e^{-k[H_2O_2]t}$

หมายเหตุ ข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.2 เริ่มคำนวณที่ระยะเวลาหลังจาก 10 นาที

เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้การลดลงในช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยานั้นมีความสำคัญต่อการลดลงของฟอร์มัลดีไฮด์ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวของฟอร์มัลดีไฮด์เมื่อทำการบำบัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและการเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำโดยการใช้ออโซนเพียงอย่างเดียว และการใช้ออโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเริ่มจากการทดสอบหาปริมาณออโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตออโซนและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำโดยใช้ออโซนเพียงอย่างเดียวและออโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. อัตราการผลิตออโซนที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตออโซนมีค่าเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง
2. ผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยออโซนที่พีเอชเท่ากับ 3, 5, 7, 9 และ 12 นั้นพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเป็นดังนี้ คือ 24 %, 15%, 8%, 19% และ 26% ตามลำดับ ซึ่งที่พีเอชเป็นกรด คือ พีเอช 3 และเบส คือ พีเอช 12 นั้นมีประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสูงที่สุด
3. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับออโซนให้ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีกว่าการใช้ออโซนเพียงอย่างเดียว โดยพบว่าที่พีเอช 12 ประสิทธิภาพการบำบัดของการใช้ออโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ 51% และในขณะที่ใช้ออโซนเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพียง 26% เท่านั้น
4. พีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับออโซน โดยที่พีเอชสูงกว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ดีกว่าที่พีเอชต่ำ โดยพีเอชเท่ากับ 7, 9 และ 12 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเป็นดังนี้คือ 28%, 29% และ 51% ตามลำดับ
5. การศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยออโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0, 60, 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นตามลำดับดังนี้คือ 26%, 51%, 59% และ 91%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยโอโซน พบว่าปฏิกิริยาการสลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนเป็นไปตามหลักปฏิกิริยาอันดับสอง ส่วนการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 60 และ 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วง 10 นาทีแรก อัตราการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์ขึ้นกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และหลังจาก 10 นาที อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามหลักปฏิกิริยา Pseudo first order

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องผลิตโอโซนทำการผลิตโอโซนออกมาได้ไม่เพียงพอที่จะทำการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้ ดังนั้นหากมีการทำการศึกษาต่อไป ควรใช้เครื่องผลิตโอโซนที่ให้อัตราการผลิตโอโซนสูงขึ้นกว่านี้
2. การศึกษาการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ ควรใช้เทคนิค Advanced oxidation processes อื่นๆ เช่น การใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวี หรือ การใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวีและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารชนิดอื่นๆ ต่อไป
3. การวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ควรทำทันทีที่เก็บตัวอย่าง เนื่องจากถ้าเก็บไว้โอโซนจะยังคงทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความผิดพลาด
4. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยโอโซน ควรทำการกำจัดโอโซนภายในถังปฏิกรณ์เสียก่อน หลังจากหยุดปฏิกิริยาก่อนที่จะนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ แต่เนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลไฟต์นั้นสามารถทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ได้ในการทดลองจึงไม่ได้ทำการกำจัดโอโซน เป็นผลทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองอาจเกิดความผิดพลาดและประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนอาจมีประสิทธิภาพสูงกว่าความเป็นจริง
5. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในช่วง 10 นาทีแรกของการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้มีการเก็บข้อมูลโดยละเอียดทำให้ไม่สามารถทำนายได้ว่าในช่วง 10 นาทีแรกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามหลักปฏิกิริยาอันดับใด

6. เนื่องจากปั๊มอากาศที่ใช้สำหรับชุดควบคุมและปั๊มอากาศในเครื่องผลิตโอโซนมีอัตราการไหลแตกต่างกันเล็กน้อยจึงอาจทำให้ผลการคำนวณปริมาณฟอรั่มลดีไฮด์ที่ลดลงคลาดเคลื่อนเล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ ศิริวรรณดี และ สราวุธธ์ เรื่องพญ์สาร. 2543. การลดปริมาณการตกค้างของสารฆ่าแมลงเมทาไมโดฟอสเฟสในผักคะน้าโดยการใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวี. โครงการงานพิเศษปริญญาตรี สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ทรงชัย พรรณสวัสดิ์ และ อุษา วิเศษสมุน. 2535. คู่มือการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. หน้า 207-211. กรุงเทพฯ: คณะกรรมการจัดทำคู่มือการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย (สวสท.) และ World Environment Center (WEC).
- พรชัย กิจสิริสินชัย, เรืองเดช จูดีพรรณกุล และ สัจด์ ทีโรสง. 2541. การศึกษาปริมาณการตกค้างของสารฟอร์มาลดีไฮด์ในผัก ภายหลังจากการเก็บรักษาและผ่านความร้อน โครงการงานพิเศษปริญญาตรี สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2539. คู่มือการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ, หน้า 142-147. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ยุพา ตันทวี. 2547. การควบคุมมลพิษทางน้ำ, หน้า 178-184. กรุงเทพฯ: โครงการตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุโขทัย เตชะวนิช และ อุบลวรรณ ขอดแสง. 2542. การนำน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันกลับมาใช้ประโยชน์โดยการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โครงการงานพิเศษปริญญาตรี สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศิริลักษณ์ ตั้งขบวนบุตร, สุภาพร ปิ่นสุวรรณศักดิ์ และ เอกชัย อติชาติธานินทร์. 2544. การศึกษาผลกระทบต่อวิตามินซีในผักคะน้าในการบำบัดยาฆ่าแมลงตกค้างโดยใช้โอโซนร่วมกับUV โครงการงานพิเศษปริญญาตรี สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Acerro, J.L., Haderlein, S.B., Schmidt, T.C., Suter, M.J. and Von, G.U. 2001. MTBE oxidation by conventional ozonation and combination ozone/hydrogen peroxide : efficiency of the processes and bromate formation. *Environmental Science Technology*. 35: 4252-4259.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Bruno, L., David, S.R., Deborah, R. **Brink in ozone in water treatment**. 2nd Edition pp. 15. Lewis Publisher, 1991.
- Chiraphon, K. **Alternative treatment of petrol station wastewater**. Master's Thesis Asian Institute of Technology Thesis, 1998.
- Eiroa, M., Kennes, C. and Veiga, M.C. 2005. Simultaneous nitrification and formaldehyde biodegradation in an activated sludge unit. **Bioresource Technology**. 96: 1914-1918.
- El – Din, M.S., Daniel, W.S., Momani, F.A. and Wang, W. 2006. Oxidation of resin and fatty acids by ozone : kinetic and toxicity study. **Water reserch**. 40: 392-400.
- Evan, S. And Francis, L. **Ozone in water and wastewater treatment**. Ann Arbor Science. Publisher, 1972.
- Glancer-Soljan, M., Soljan, V., Dragicevic, T.L. and Cacic, L. 2001. Aerobic degradation of formaldehyde in wastewater from the production of melamine resins. **Food technol Biotechnol**. 39: 197-202.
- Kolah, A.K. and Sharma, M.M. 1995. Removal of formaldehyde from aqueous solutions. **Separations Technology**. 5: 13-22 .
- Kosaka, K., Yamada, H., Shishida, K., Echigo, S., Minear, R.A., Tsuno, H. and Matsui, S. 2001. Evaluation of treatment performance of a multistage ozone/hydrogen peroxide process by decomposition by-products. **Water Research**. 35: 3587-3594.
- Lotfy, H.R. and Rashed, I.G. 2001. A method for treating wastewater containing formaldehyde. **Water Research**. 36: 633-637.
- Mitani, M.M., Keller, A.A., Bunton, C.A., Rinker, R.G. and Sandall, O.C. 2002. Kinetics and products of reactions of MTBE with ozone and ozone/hydrogen peroxide in water. **Journal of Hazardous Materials**. B89: 197-212.
- Oliveira, S.V.W.B., Moraes, E.M., Adorno, M.A.T. and Varesch, M.B.A. 2004. Formaldehyde degradation in an anaerobic packed bioreactor. **Water research**. 38: 1685-1694.
- Silva, A.M.T., Castelo-Branco, I.M., Quinta-Ferreira, R.M. and Levec, J. 2003. Catalytic studies in wet oxidation of effluents from formaldehyde industry. **Chemical Engineering Science**. 58: 963-970.

Tanada, S., Kawasaki, N., Nakamura, T., Araki, M. and Isomura, M. 1999. Removal of formaldehyde by activated carbons containing amino groups. **Journal of Colloid and Interface Science**. 214: 106-108.

Vidal, G., Jiang, Z.P., Omil, F., Thalasso, F., Mendez, R. and Lema, J.M. 1999. Continuing formaldehyde and urea. **Bioresource technology**. 70: 283-291.

www.avogadro.cbem.edu/MSDS/H2O2_3pct.htm, 14/03/49

www.cac.goul/niosh/idlh/5000.html, 14/03/49

www.cedis.or.th/news/detail_news.php?id=237, 20/06/48

www.gewater.com/pdf/msds/1119827-%20MSDS-%20Formaldehyde.pdf, 23/10/48

www.h2o2.com/applications/industrialwastewater/hcho.html, 18/03/49

www.lenntech.com/ozone/ozone-decomposition.htm, 14/03/49

www.lenntech.com/ozone/ozone-reaction-mechanisms.html, 18/03/49

www.meridianeng.com/formaldehyde.html, 14/03/49

www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html, 23/10/48

www.sciencelab.com/XMSDS_Formaldehe_10_V_V_Neufralized_9925912, 14/03/49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก-1

การวิเคราะห์ไอโซน

1. การเตรียมสาร

1.1 การเตรียมสารละลายสต็อกไอโอดีน ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ หรือ I_2 0.05 นอร์มอล

1. ชั่ง KI มา 16 กรัม และเกลือดีไอโอดีนระเหิด 3.173 กรัม
2. นำมาละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เป็น 500 มิลลิลิตร
3. เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำมาใช้ 1 วัน

1.2 การเตรียมสารละลาย KI 1% ในบัฟเฟอร์ฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

1. ชั่ง KI มา 200 กรัม, KH_2PO_4 272 กรัม และ Na_2HPO_4 284 กรัม
2. ละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันในน้ำที่ปราศจากไอออน
3. ปรับปริมาตรให้เป็น 20 ลิตร ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน
4. เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน โดยห้ามไม่ให้โดนแสง วัตถุพิษและปรับให้อยู่ในช่วง 6.8 ± 0.2 ด้วย NaOH หรือ K_2HPO_4

1.3 การเตรียมน้ำแข็ง

1. ชั่งแข็งมา 5 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. เทใส่บีกเกอร์ นำไปต้มที่ 60 องศาเซลเซียส
3. ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. กรองเอาแต่ส่วนใส
5. เติมโทลูอิน 1 หยด

2. การสร้างกราฟมาตรฐานไอโชน

2.1 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล

1. ชั่ง $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ มา 3.9526 กรัม
2. ละลายในน้ำที่เพิ่งเดือด และปรับปริมาตรด้วยน้ำเดือดให้เป็น 1 ลิตร
3. ทิ้งไว้ 1 วันก่อนนำมาใช้

2.2 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดต ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล

1. ชั่ง KIO_3 0.0892 กรัม
2. นำมาละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

2.3 วิธีการหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐาน KIO_3 ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล มา 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปกรวย
2. เติม KI มากเกินพอ
3. เติมกรด HCl 3 หยด
4. ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชา
5. เติมน้ำแข็ง 1 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงิน
6. ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี
7. บันทึกปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้
8. ทำการทดลองอีก 2 ครั้ง จนปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้แตกต่างกันไม่เกิน 0.1 มิลลิลิตร

2.4 การเทียบมาตรฐานสารละลายสต็อกไอโอดีน

1. ปิเปตสารละลายสต็อก ไอโอดีนมา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปกรวย
2. เติมน้ำแข็ง 1 มิลลิลิตร
3. นำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจนได้สารละลายใสไม่มีสี
4. ทำการทดลองอีก 2 ครั้ง จนปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้แตกต่างกันไม่เกิน 0.1 มิลลิลิตร

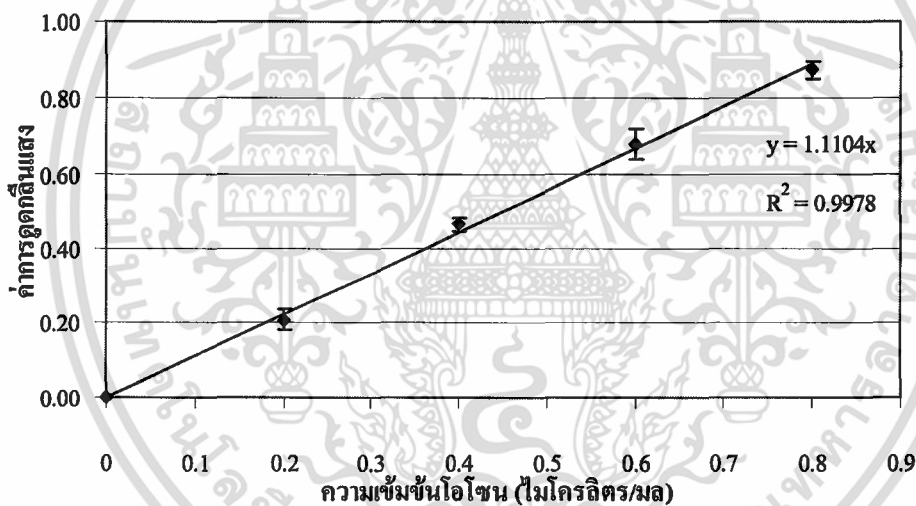
2.5 สร้างกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายสต็อก ไอโอดีน ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ มา 4.09 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. ปิเปตสารละลายข้างต้นมา 0, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลาย 1% KI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ผลการทำกราฟมาตรฐานไอโซน

ความเข้มข้น O_3 (ไมโครลิตร/มล.)	ค่าการดูดกลืนแสง				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.19	0.24	0.20	0.21	0.03
0.4	0.47	0.48	0.45	0.47	0.02
0.6	0.69	0.71	0.63	0.68	0.04
0.8	0.85	0.89	0.88	0.87	0.02



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐาน ไอโซน

3. การวิเคราะห์ปริมาณไอโซน

นำสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ผ่านการดักจับไอโซนไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร

ภาคผนวก ก-2

การวิเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์

1. การเตรียมสาร

1.1 อะเซททิลอะซีโตน

1. ละลายแอมโมเนียอะซีเตต 75 กรัม ในน้ำกลั่น
2. เติมกรดเกลืออะซีติก 1.5 มิลลิลิตร และอะเซททิลอะซีโตน 1 มิลลิลิตร
3. ปรับปริมาตรให้เป็น 500 มิลลิลิตร

1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.00 นอร์มอล

1. ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12.5 กรัม ในน้ำกลั่น
2. ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

1.3 สารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.00 นอร์มอล

1. เปิดสารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 96% มา 111.26 มิลลิลิตร
2. ใส่ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 888.74 มิลลิลิตร

1.4 สารละลายไทมอลพาทินอินดิเคเตอร์

1. ละลายไทมอลพาทิน 0.1 กรัม ในเอทานอล
2. เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
3. ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

2. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์

1. เปิดสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์มา 15 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
3. เปิดสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่เตรียมแล้ว มา 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย
4. เติมไทมอลพาทิน 2 หยด แล้วปรับพีเอชของสารละลายให้เป็นกลาง
5. เปิดสารละลายโซเดียมซัลไฟต์มา 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวยอีกขวด แล้วทำการปรับพีเอชสารละลายให้เป็นกลาง
6. เทสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ลงในสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (สีของสารละลายจะเป็นสีฟ้าน้ำเงิน)
7. นำสารละลายที่ได้ไปทำการไทเทรตกับกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล จนถึงจุดยุติโดยสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็น ไม่มีสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำซ้ำอีก 2 ซ้ำ โดยปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ ต้องแตกต่างกันไม่เกิน 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของฟอร์มาลดีไฮด์
9. เมื่อทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของฟอร์มาลดีไฮด์แล้ว ทำการเจือจางให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก-2 ผลการไทเทรตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์กับสารละลายกรดซัลฟิวริก

ขวด	ปริมาตร H ₂ SO ₄ เริ่มต้น (มิลลิลิตร)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ ที่จุดยุติ (มิลลิลิตร)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ ที่ใช้ไป (มิลลิลิตร)	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.00	5.10	5.10	5.03	0.06
2	6.00	11.00	5.00		
3	11.00	16.00	5.00		

สามารถคำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของฟอร์มาลดีไฮด์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (มก./ล)} &= \frac{A \times 30.03 \times 1,000}{25} \\
 &= \frac{5.03 \times 30.03 \times 1,000}{25} \\
 &= 6,042 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}
 \end{aligned}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ (มิลลิลิตร)

สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่เตรียมมีความเข้มข้นเท่ากับ 6,042 มิลลิกรัมต่อลิตร
 ดังนั้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์มีความเข้มข้นเท่ากับ 6,042 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

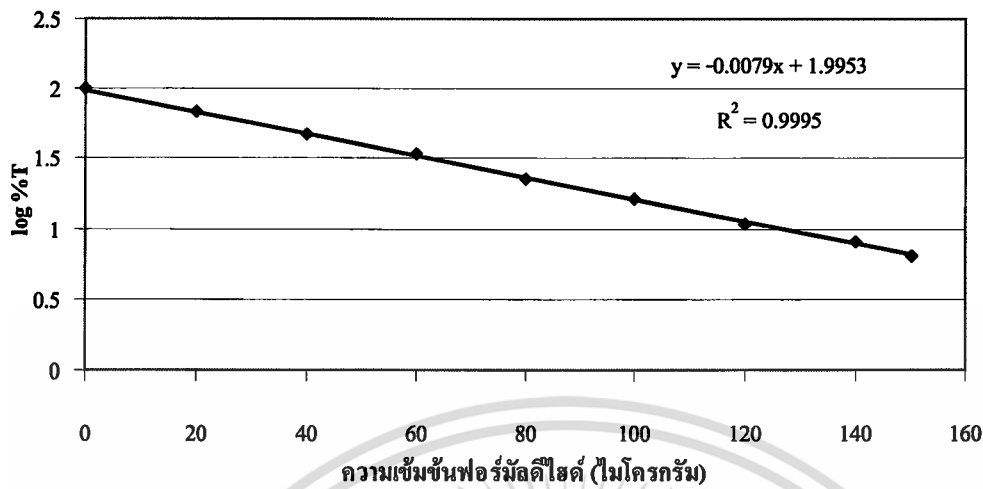
3. การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ให้มีความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 และ 150 ไมโครกรัม โดยปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 15 มิลลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 มล. จากนั้นทำการเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 5 มิลลิตร และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล 5 มิลลิตร แล้วปรับปริมาตรทุกขวดด้วยน้ำกลั่น
2. เทสารละลายที่เตรียมไว้ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิตร โดยล้างขวดเดิมด้วยอะเซททิลอะซีโตน แล้วปรับปริมาตรด้วยอะเซททิลอะซีโตน
3. เทสารละลายที่เตรียมแล้วไว้ในขวดรูปกรวย ต้มที่ 60 °C นาน 10 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นนำไปวัดค่าการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร ทำการเขียนกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นกับค่าการการส่องผ่านของแสง โดยพล็อตกราฟ SEMILOG

ตารางที่ ก-3 ผลการทำกราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ (ไมโครกรัม)	ค่า log % T				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00
20	1.84	1.84	1.84	1.84	0.00
40	1.67	1.67	1.67	1.67	0.00
60	1.53	1.54	1.53	1.53	0.00
80	1.36	1.35	1.36	1.36	0.00
100	1.21	1.20	1.21	1.21	0.00
120	1.04	1.03	1.04	1.04	0.01
140	0.91	0.90	0.91	0.91	0.00
150	0.81	0.81	0.82	0.81	0.01


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

3. การวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์

1. นำน้ำตัวอย่างมาทำการเจือจาง 10 เท่า แล้วเปิดสารละลายตัวอย่างที่เจือจางแล้ว มา 15 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร
2. เติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล 5 มิลลิลิตร
3. เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล 5 มิลลิลิตร
4. เทสารละลายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย อะเซททิลอะซีโตน
5. จากนั้นเทใส่ในขวดรูปกรวย นำไปต้มที่ 60 °C นาน 10 นาทีทิ้งไว้ให้เย็น
6. นำไปวัดค่าการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร



ภาคผนวก ข

ข-1 การทดสอบการผลิตโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซน

ข-2 การทดสอบการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

ข-3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของฟอร์มาลดีไฮด์

ภาคผนวก ข-1

การทดสอบการผลิตโอโซนด้วยเครื่องผลิตโอโซน

การทดสอบหาปริมาณ โอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน (รุ่น OZ -735 บริษัท Ozzon)
ได้ผลการทดลองดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิต โอโซน

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	
	คอลัมน์ + ภาชนะที่ 1*	ภาชนะที่ 2
0	0.00	0.00
10	0.16	0.00
20	0.35	0.01
30	0.50	0.02
40	0.64	0.02

หมายเหตุ * เจือจาง 10 เท่า

จากตาราง ข-1 สามารถคำนวณหาปริมาณของ โอโซน (ในหน่วยไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร)
ได้จากกราฟมาตรฐาน ก-1 ดังตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้
- หาปริมาณ โอโซนที่ผลิตได้ในเวลา 10 นาที (คอลัมน์ + ภาชนะที่ 1)
จากกราฟมาตรฐาน (รูป ก-1)

$$y = 1.1104 X$$

y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

$$X = \frac{0.16}{1.1104}$$

X คือ ค่าความเข้มข้น โอโซน ($\mu\text{L}/\text{mL}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย KI ที่ใช้ในการดักโอโซนมีปริมาตร 6,000 มิลลิลิตร
โอโซนที่ผลิตได้ในเวลา 10 นาที

$$= 0.144 \text{ } \mu\text{L/mL} \times 6000 \text{ ml} \times 10^{-3} = 0.865 \text{ ml}$$

อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศที่สภาวะมาตรฐานโอโซน 1 โมล มีปริมาตร 24.47 ลิตร ดังนั้นโอโซนที่ผลิตได้ในเวลา 10 นาที ที่สภาวะมาตรฐาน

$$= 0.865 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ mol O}_3}{24.47 \text{ L}} \times \frac{48.0 \text{ gO}_3}{1 \text{ molO}_3} = 1.697 \text{ mg}$$

ทำการเจือจาง 10 เท่า ดังนั้นปริมาณโอโซนที่คำนวณได้ เท่ากับ 17 มิลลิกรัม

ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลา 20 30 และ 40 นาที ทำการคำนวณเช่นเดียวกับวิธีข้างต้น และได้ผลการคำนวณ ดังตารางที่ ข-2

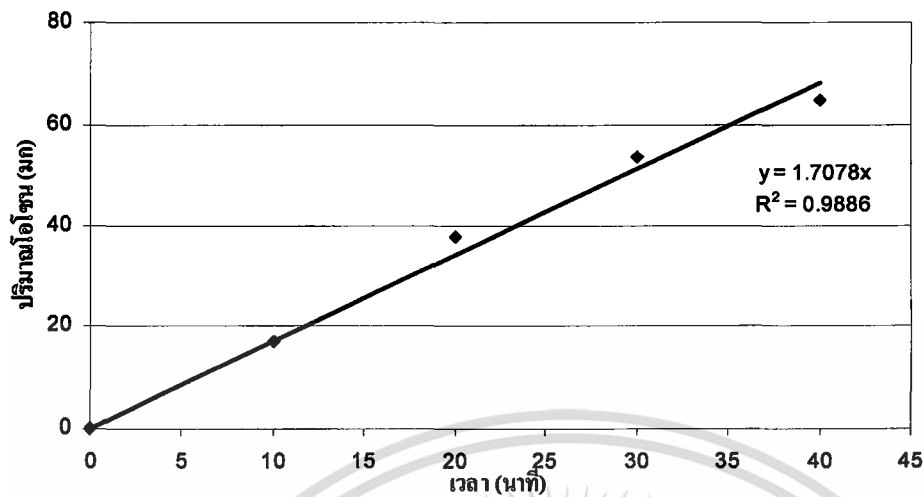
ตารางที่ ข-2 ผลการคำนวณปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

เวลา (นาที)	ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ (มิลลิกรัม)		
	คอลัมน์ + ภาชนะที่ 1	ภาชนะที่ 2	รวม
0	0.00	0.00	0.00
10	17.00	0.00	17.00
20	37.73	0.02	37.75
30	53.60	0.06	53.66
40	64.65	0.06	64.71

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน

เวลา (นาที)	ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ (มิลลิกรัม)
0	0.00
10	17.02
20	37.75
30	53.66
40	64.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 กราฟประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน (รุ่น OZ – 735 บริษัท Ozzon ประเทศไทย)

จากรูปที่ ข-1 จะได้สมการ $y = 1.7078X$ ซึ่งจะสามารถหาอัตราการผลิตโอโซนในหนึ่งชั่วโมงได้โดยแทนค่า $X = 60$ นาที ในสมการเส้นตรงของรูปที่ ข-1 ดังนั้นอัตราการผลิตของเครื่องผลิตโอโซนจะได้เท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

ภาคผนวก ข-2

การทดสอบการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

จากการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนที่พีเอช 3 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ ข-4 และสามารถคำนวณหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่ลดลงได้ ดังนี้
ตารางที่ ข-4 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

เวลา (นาที)	Log %T ที่ 425 nm				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.81	0.82	0.81	0.82	0.00
10	0.85	0.85	0.84	0.84	0.00
20	0.88	0.87	0.87	0.87	0.00
30	0.92	0.91	0.92	0.92	0.00
45	0.99	1.00	0.99	0.99	0.00
60	1.01	1.01	1.01	1.01	0.00
90	1.05	1.05	1.05	1.05	0.00
120	1.10	1.10	1.10	1.10	0.00

- การหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือจากการบำบัดที่เวลา 10 นาที

จากกราฟมาตรฐานรูปที่ ก-2 ได้สมการเส้นตรง $y = -0.0079 X + 1.9952$
จะสามารถคำนวณได้ดังนี้ (X คือ ค่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์, Y คือ ค่า log %T)

$$X = \frac{1.9952 - 0.82}{0.0079} = 145.86 \text{ ไมโครกรัม}$$

สูตรการคำนวณหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ฟอร์มาลดีไฮด์ (มก/ล)} &= \frac{\text{ไมโครกรัมฟอร์มาลดีไฮด์ที่อ่านได้จากกราฟ}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}} \\ &= \frac{145.86}{15} = 9.724 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ที่ระยะเวลาบำบัด เท่ากับ 10 นาที มีปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ เท่ากับ 9.724 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่
ระยะเวลาบำบัด เท่ากับ 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที ทำการคำนวณดังแสดงข้างต้น

ภาคผนวก ข-3

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของฟอร์มัลดีไฮด์

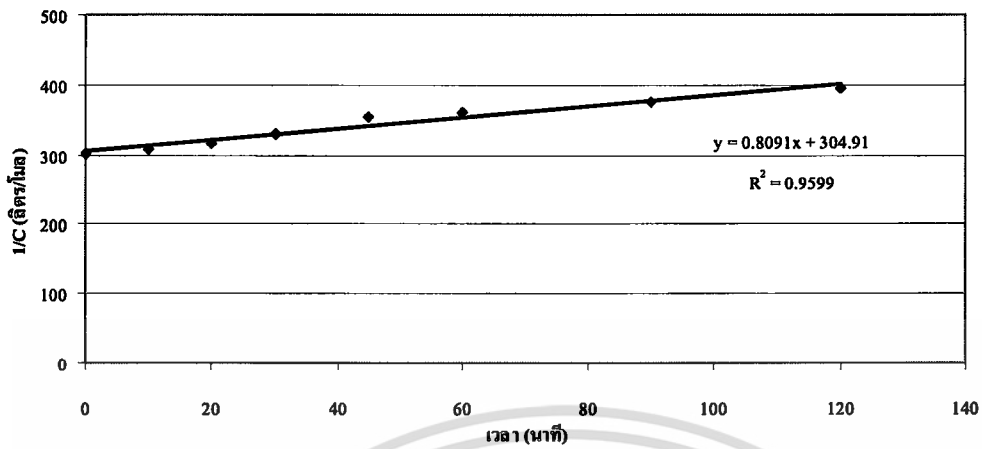
1. การพล็อตระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลา

การพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ที่ลดลงในหน่วยโมลต่อลิตร เปรียบเทียบกับระยะเวลาในหน่วยนาที เพื่อหาว่าปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับ โอโซนเกิดขึ้น เป็นไปตามหลักปฏิกิริยาอันดับใด โดยตัวอย่างการหาอันดับปฏิกิริยาที่สภาวะการทดลองซึ่งมีความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นเท่ากับ 99.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโอโซนผ่านเข้าสู่ระบบบำบัด เท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และพีเอชเท่ากับ 3 ได้ผลการคำนวณหาอันดับปฏิกิริยาดังแสดงไว้ในตารางที่ ข-5

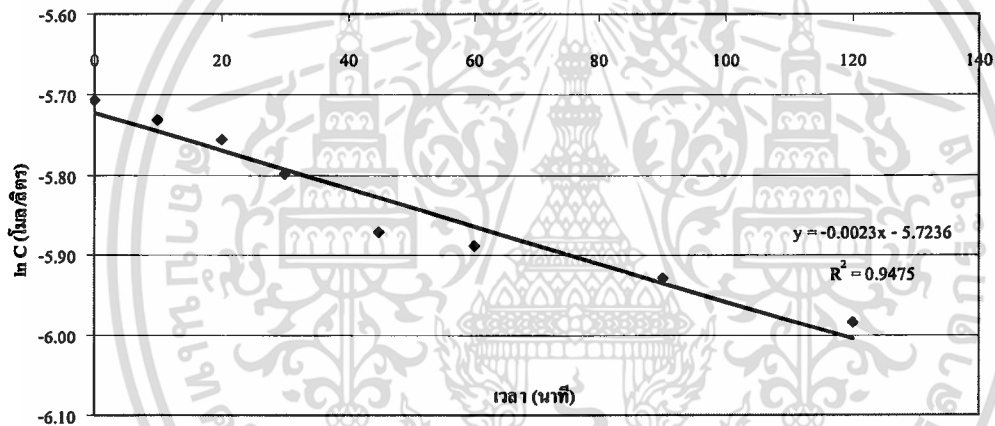
ตารางที่ ข-5 ผลการคำนวณจลนพลศาสตร์

เวลา (นาที)	FM (มิลลิกรัมต่อลิตร)	FM (โมลต่อลิตร)	lnFM (โมลต่อลิตร)	1/FM (ลิตรต่อโมล)
0	99.59	0.0033	-5.71	301.23
10	97.24	0.0032	-5.73	308.52
20	94.86	0.0032	-5.76	316.25
30	90.97	0.0030	-5.80	329.79
45	84.61	0.0028	-5.87	354.58
60	83.15	0.0028	-5.89	360.81
90	79.95	0.0027	-5.93	375.25
120	75.72	0.0025	-5.98	396.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

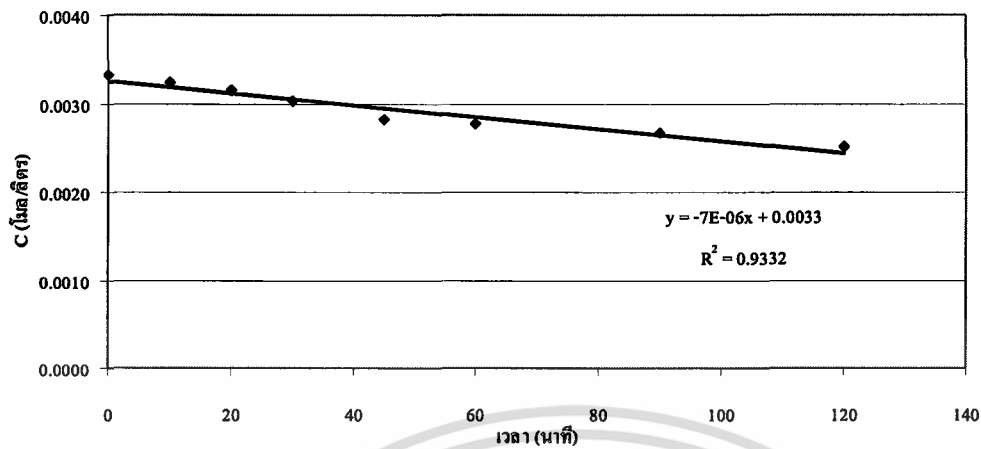


รูปที่ ข-2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ โดยพล็อตระหว่างความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์ (FM) ในหน่วยโมลต่อลิตรกับเวลา



รูปที่ ข-3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยพล็อตระหว่างความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์ (ln FM) ในหน่วยโมลต่อลิตรกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-4 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสอง โดยพล็อตระหว่างความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์ (1/FM) ในหน่วยลิตรต่อโมลกับเวลา

จากการพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นเปรียบเทียบกับเวลา พบว่าปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับไอโซนเป็นตามหลักปฏิกิริยาอันดับสอง โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่ได้จากสมการเส้นตรงที่มีค่าเข้าใกล้ 1.00 มากที่สุด ซึ่งได้ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ ข-6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับ ไอโซน

สถานะ	อันดับปฏิกิริยา	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) (ลิตรต่อโมล-นาที)	R^2	สมการ
พีเอช 3	สอง	0.8091	0.9599	$C_t = C_0 / (1 + C_0 k t)$
พีเอช 5	สอง	0.3698	0.8545	$C_t = C_0 / (1 + C_0 k t)$
พีเอช 7	สอง	0.2258	0.7985	$C_t = C_0 / (1 + C_0 k t)$
พีเอช 9	สอง	0.5074	0.8290	$C_t = C_0 / (1 + C_0 k t)$
พีเอช 12	สอง	0.8609	0.9681	$C_t = C_0 / (1 + C_0 k t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าการ เจือจาง	ปริมาตร 1% KI (ml)		ปริมาตรโอโซน (ml)			ปริมาณโอโซน (mg)		
	คอัลมันน์ *	ภาชนะบรรจุ KI ขวด 1 *	ภาชนะบรรจุ KI ขวด 2		คอัลมันน์ + ขวด 1	ขวด 2	คอัลมันน์ + ขวด 1	ขวด 2	รวม	คอัลมันน์ + ขวด 1	ขวด 2	รวม
0	0.0000	0.0000	0.0000	10	6000	2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1476	0.0130	0.0000	10	6000	2000	0.87	0.00	0.87	17.02	0.00	17.02
20	0.3336	0.0230	0.0050	10	5990	1990	1.92	0.01	1.93	37.73	0.02	37.75
30	0.4727	0.0347	0.0180	10	5980	1980	2.73	0.03	2.76	53.60	0.06	53.66
40	0.5640	0.0490	0.0163	10	5970	1970	3.30	0.03	3.32	64.65	0.06	64.71

ตารางที่ ก-2 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนที่พีเอช 3 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

เวลา (นาท)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (ug)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณโอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.50	6.60	6.50	6.53	0.06	149.39	99.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	7.00	7.00	6.90	6.97	0.06	145.86	97.24	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	25	11.60	5.42
20	37.75	10	7.50	7.40	7.40	7.43	0.06	142.29	94.86	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	25	21.40	16.35
30	53.66	10	8.30	8.20	8.30	8.27	0.06	136.45	90.97	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	25	21.99	31.67
45	64.71	10	9.80	9.90	9.80	9.83	0.06	126.91	84.61	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	25	22.10	42.61
60	102.19	10	10.20	10.20	10.30	10.23	0.06	124.72	83.15	0.32	0.32	0.32	0.32	0.00	25	55.12	47.07
90	153.29	10	11.10	11.20	11.20	11.17	0.06	119.92	79.95	0.59	0.59	0.59	0.59	0.00	25	100.24	53.05
120	204.38	10	12.50	12.50	12.60	12.53	0.06	113.57	75.72	0.82	0.82	0.82	0.82	0.00	25	139.40	64.98

ตารางที่ ค-3 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนที่พีเอช 5 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (ug)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณโอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.50	6.40	6.40	6.43	0.06	150.24	100.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	7.70	7.60	7.70	7.67	0.06	140.59	93.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25	0.29	16.73
20	37.75	10	8.00	7.90	8.00	7.97	0.06	138.48	92.32	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	25	17.43	20.32
30	53.66	10	8.10	8.10	8.10	8.10	0.00	137.57	91.71	0.19	0.19	0.19	0.19	0.00	25	32.74	20.92
45	64.71	10	8.30	8.20	8.20	8.23	0.06	136.67	91.12	0.25	0.25	0.25	0.25	0.00	25	43.40	21.31
60	102.19	10	8.40	8.30	8.30	8.33	0.06	136.01	90.67	0.46	0.46	0.45	0.46	0.00	25	80.38	21.81
90	153.29	10	9.60	9.50	9.50	9.53	0.06	128.61	85.74	0.68	0.68	0.67	0.67	0.00	25	119.18	34.10
120	204.38	10	9.60	9.60	9.70	9.63	0.06	128.04	85.36	0.97	0.97	0.97	0.97	0.00	25	171.71	32.67

ตารางที่ ค-4 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนที่พีเอช 7 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

เวลา (นาท)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (ug)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณ โอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	8.00	7.90	7.90	7.93	0.06	138.71	92.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	8.10	8.10	8.10	8.10	0.00	137.57	91.71	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	50	1.60	15.42
20	37.75	10	8.70	8.70	8.60	8.67	0.06	133.85	89.24	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	50	15.66	22.09
30	53.66	10	8.90	8.90	8.90	8.90	0.00	132.39	88.26	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	50	27.93	25.73
45	64.71	10	9.10	9.10	9.20	9.13	0.06	130.97	87.31	0.11	0.11	0.12	0.11	0.01	50	39.04	25.67
60	102.19	10	9.50	9.50	9.60	9.53	0.06	128.61	85.74	0.21	0.21	0.21	0.21	0.00	50	71.17	31.02
90	153.29	10	9.50	9.60	9.50	9.53	0.06	128.61	85.74	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00	50	123.65	29.64
120	204.38	10	9.60	9.60	9.70	9.63	0.06	128.04	85.36	0.52	0.52	0.52	0.52	0.00	50	176.94	27.45

ตารางที่ ก-5 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนที่พีเอช 9 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

เวลา (นาท)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (mg)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณโอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	7.10	7.00	7.00	7.03	0.06	145.33	96.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	8.90	8.90	8.80	8.87	0.06	132.60	88.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25	0.41	16.61
20	37.75	10	9.20	9.20	9.20	9.20	0.00	130.57	87.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	25	11.95	25.80
30	53.66	10	9.70	9.70	9.60	9.67	0.06	127.85	85.23	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	25	16.50	37.16
45	64.71	10	10.10	10.10	10.10	10.10	0.00	125.44	83.63	0.17	0.17	0.17	0.17	0.00	25	28.76	35.95
60	102.19	10	10.10	10.20	10.10	10.13	0.06	125.26	83.51	0.35	0.35	0.34	0.34	0.00	25	59.00	43.19
90	153.29	10	11.40	11.50	11.40	11.43	0.06	118.62	79.08	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	25	84.67	68.62
120	204.38	10	11.50	11.60	11.60	11.57	0.06	117.99	78.66	0.93	0.93	0.93	0.93	0.00	25	156.98	47.40

ตารางที่ ๓-6 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนที่พีเอช 12 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

เวลา (นาท)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (mg)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณโอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.60	6.60	6.50	6.57	0.06	149.11	99.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	7.10	7.20	7.10	7.13	0.06	144.56	96.37	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	50	6.76	10.26
20	37.75	10	7.60	7.60	7.40	7.53	0.12	141.56	94.37	0.02	0.03	0.03	0.03	0.00	50	8.82	28.93
30	53.66	10	8.60	8.70	8.60	8.63	0.06	134.07	89.38	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	50	17.66	36.00
45	64.71	10	9.90	10.00	10.00	9.97	0.06	126.17	84.11	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	50	19.41	45.30
60	102.19	10	10.50	10.50	10.40	10.47	0.06	123.48	82.32	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	50	51.98	50.21
90	153.29	10	11.50	11.40	11.40	11.43	0.06	118.62	79.08	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	50	95.69	57.60
120	204.38	10	13.10	13.10	13.20	13.13	0.06	111.00	74.00	0.40	0.40	0.40	0.40	0.00	50	134.09	70.30

ตารางที่ ก-7 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 7 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (mg)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณโอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.70	6.60	6.60	6.63	0.06	148.55	99.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	8.26	8.27	8.26	8.26	0.01	136.47	90.98	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	25	2.00	15.02
20	37.75	10	8.96	8.96	8.95	8.96	0.01	132.04	88.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	25	7.25	30.50
30	53.66	10	9.26	9.28	9.27	9.27	0.01	130.15	86.77	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	25	18.58	35.08
45	64.71	10	10.10	10.20	10.10	10.13	0.06	125.26	83.51	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	25	21.53	43.18
60	102.19	10	11.30	11.50	11.50	11.43	0.12	118.62	79.08	0.31	0.31	0.31	0.31	0.00	25	53.23	48.96
90	153.29	10	11.90	12.10	12.10	12.03	0.12	115.81	77.21	0.61	0.61	0.61	0.61	0.00	25	104.22	49.07
120	204.38	10	13.70	13.70	13.60	13.67	0.06	108.81	72.54	0.87	0.87	0.87	0.87	0.00	25	146.98	57.41

ตารางที่ ค-8 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 9 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (mg)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณโอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.60	6.60	6.70	6.63	0.06	148.55	99.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	8.50	8.60	8.60	8.57	0.06	134.49	89.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25	0.47	16.55
20	37.75	10	9.60	9.60	9.70	9.63	0.06	128.04	85.36	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	25	6.55	31.20
30	53.66	10	10.00	10.10	10.10	10.07	0.06	125.62	83.75	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	25	15.41	38.25
45	64.71	10	10.20	10.30	10.30	10.27	0.06	124.54	83.03	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	25	22.97	41.74
60	102.19	10	12.00	12.00	12.10	12.03	0.06	115.81	77.21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.00	25	42.84	59.35
90	153.29	10	13.90	13.90	13.80	13.87	0.06	108.02	72.01	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00	25	87.34	65.95
120	204.38	10	14.60	14.60	14.70	14.63	0.06	105.06	70.04	0.78	0.78	0.78	0.78	0.00	25	132.51	71.88

ตารางที่ ค-9 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 12 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (mg)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณ โอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.70	6.70	6.80	6.73	0.06	147.73	98.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	18.30	18.40	18.40	18.37	0.06	92.57	61.71	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	25	5.25	11.77
20	37.75	10	19.30	19.20	19.30	19.27	0.06	89.94	59.96	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	25	8.70	29.05
30	53.66	10	19.70	19.90	19.80	19.80	0.10	88.43	58.96	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	25	15.98	37.68
45	64.71	10	20.60	20.80	20.80	20.73	0.12	85.90	57.27	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	25	16.88	47.83
60	102.19	10	22.20	22.20	22.30	22.23	0.06	82.06	54.71	0.27	0.27	0.27	0.27	0.00	25	45.41	56.78
90	153.29	10	25.10	25.20	25.20	25.17	0.06	75.25	50.17	0.50	0.51	0.50	0.50	0.00	25	85.24	68.05
120	204.38	10	26.70	26.70	26.70	26.70	0.00	72.00	48.00	0.77	0.77	0.77	0.77	0.00	25	130.02	74.37

ตารางที่ ค-10 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 12 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (mg)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณ โอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.90	6.90	6.90	6.90	0.00	146.39	97.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	22.90	22.90	22.90	22.90	0.00	80.44	53.63	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	25	1.34	15.68
20	37.75	10	23.90	23.90	23.80	23.87	0.06	78.17	52.11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	25	2.15	35.60
30	53.66	10	24.20	24.20	24.20	24.20	0.00	77.40	51.60	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	25	2.54	51.12
45	64.71	10	26.40	26.40	26.40	26.40	0.00	72.62	48.41	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	25	4.88	59.83
60	102.19	10	26.90	27.00	26.90	26.93	0.06	71.52	47.68	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	25	15.31	86.88
90	153.29	10	30.30	30.40	30.60	30.43	0.15	64.80	43.20	0.20	0.21	0.21	0.20	0.00	25	34.83	118.45
120	204.38	10	33.10	33.00	33.20	33.10	0.10	60.19	40.12	0.45	0.45	0.46	0.45	0.00	25	77.05	127.33

ตารางที่ ก-11 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 12 ปริมาณโอโซนที่ให้ระบบเท่ากับ 102 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ปริมาณ โอโซน (mg)	ค่าการ เจือจาง	%T ที่ 425 nm					ปริมาณ FM (mg)	ความ เข้มข้น FM (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 352 nm					ค่าการ เจือจาง	ปริมาณโอโซน (mg)	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD		ที่เหลือ	ที่ใช้ไป
0	0.00	10	6.80	6.94	6.72	6.82	0.11	147.03	98.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
10	17.02	10	46.70	47.30	47.10	47.03	0.31	40.87	27.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	1	0.04	16.98
20	37.75	10	55.90	56.20	56.10	56.07	0.15	31.21	20.81	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	1	0.05	37.70
30	53.66	10	67.40	68.10	67.90	67.80	0.36	20.77	13.85	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	1	0.15	53.51
45	64.71	10	73.10	73.60	73.50	73.40	0.26	16.41	10.94	0.32	0.32	0.32	0.32	0.00	1	2.22	62.49
60	102.19	10	75.00	75.30	75.20	75.17	0.15	15.10	10.07	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	1	3.42	98.77
90	153.29	10	78.00	78.30	78.20	78.17	0.15	12.95	8.63	0.79	0.79	0.76	0.78	0.01	1	5.31	147.98
120	204.38	10	78.10	78.50	78.50	78.37	0.23	12.81	8.54	0.80	0.80	0.80	0.80	0.00	1	5.41	198.97