

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันกลับมาใช้ประโยชน์โดยการบำบัดด้วย  $O_3/H_2O_2$



นางสาวสุโขทัย เตชะวณิช  
นางสาวอุบลวรรณ ยอดแสง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหน.....  
เลขทะเบียน..... 37629  
วัน, เดือน, ปี 19 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECYCLING OF PETROL STATION WASTEWATER BY  $O_3/H_2O_2$  TREATMENT.



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science.

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang.

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การนำน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันกลับมาใช้ประโยชน์โดยการบำบัด  
ด้วย  $O_3/H_2O_2$   
โดย นางสาวสุโขทัย เตชะวณิช  
นางสาวอุบลวรรณ ยอดแสง  
ภาควิชา เคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

\_\_\_\_\_  
หัวหน้าภาควิชาเคมี  
(ผศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

  
ประธานกรรมการ  
(อาจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์)

  
กรรมการ  
(อาจารย์ยุพา ตันทวี)

\_\_\_\_\_  
กรรมการ  
(ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                    |   |
|--------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การนำน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันกลับมาใช้ประโยชน์โดยการบำบัดด้วย $O_3/H_2O_2$ |
| นักศึกษา           | นางสาวสุโขทัย เตชะวงนิช<br>นางสาวอุบลวรรณ ยอดแสง                              |
| อาจารย์ที่ปรึกษา   | ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์   |
| ระดับการศึกษา      | วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม                                 |
| ปีการศึกษา         | 2542  |

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวและใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ Spectrophotometric method ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้เท่ากับ 0.342 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ในการทดลองตอนแรกทำการวิจัยหาสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว โดยแปรค่าพีเอชเป็น 4 7 และ 9 จากการศึกษาพบว่าที่พีเอช 9 สามารถบำบัดค่าบีโอดี ซีโอดี และปริมาณไขมันและน้ำมันได้ดี ยกเว้นการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดบำบัดได้ดีที่สุดที่พีเอช 4 เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการบำบัดจึงทำการแปรค่าเวลาบำบัดเป็น 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี บีโอดี และปริมาณไขมันและน้ำมันมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาการบำบัดเพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟสามารถหาอัตราการบำบัดซีโอดี บีโอดี และปริมาณไขมันและน้ำมันได้ เท่ากับ 39.41 43.98 และ 18.02 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดไม่ควรเพิ่มเวลามากกว่า 0.5 ชั่วโมง เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อใช้เวลาในการบำบัดมากกว่า 0.5 ชั่วโมง ในการทดลองตอนที่สองเป็นการศึกษาการบำบัดโดยใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่พีเอช 9 เวลาบำบัด 1.5 ชั่วโมง และแปรค่าจำนวนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.025 0.05 0.08 0.10 และ 0.15 มิลลิโมล ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดีกว่าการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว และประสิทธิภาพการบำบัดในทุกพารามิเตอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้จำนวนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษได้รับความอนุเคราะห์จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ยุพา ตันทวี อาจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์พิสมัย ชัยรัตนอุทัย อาจารย์อรุณี คงศักดิ์ไพศาล และ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในระหว่างการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นอกเหนือจากบุคคลที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ และให้กำลังใจตลอดโครงการพิเศษนี้ ทางผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สุโขทัย เตชะวณิช

อุบลวรรณ ยอดแสง

# สารบัญ

หน้า

|   |    |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                   | ก  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                | ข  |
| กิตติกรรมประกาศ                                   | ค  |
| สารบัญ  | ง  |
| สารบัญตาราง                                       | ช  |
| สารบัญรูป   | ซ  |
| คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้                           | ณ  |
| บทที่ 1 บทนำ                                      |    |
| 1.1 ความสำคัญ และที่มาของโครงการพิเศษ             | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์                                  | 2  |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย                             | 2  |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน                   | 2  |
| 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ                           | 3  |
| บทที่ 2 ทฤษฎี และ หลักการ                         |    |
| 2.1 น้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน                   | 4  |
| 2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมัน                         | 4  |
| 2.1.2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน     | 5  |
| 2.1.3 ผลกระทบของน้ำมันต่อสิ่งมีชีวิต              | 5  |
| 2.1.4 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากสถานีบริการน้ำมัน    | 6  |
| 2.2 การกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง            | 7  |
| 2.2.1 หลักการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง      | 7  |
| 2.2.2 วิธีการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง      | 9  |
| 2.3 การใช้โอโซนบำบัดน้ำเสีย                       | 9  |
| 2.3.1 คุณสมบัติของโอโซน                           | 9  |
| 2.3.2 ข้อได้เปรียบของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย | 10 |
| 2.3.3 ระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้โอโซน                 | 11 |
| 2.3.4 การผลิตโอโซน                                | 12 |
| 2.3.5 บทบาทของโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย              | 14 |
| 2.3.6 การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย        | 14 |
| 2.3.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนในน้ำเสีย       | 16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| 2.4 การประยุกต์ใช้โอโซน   | 18 |
| 2.4.1 การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน   | 18 |
| 2.4.2 การประยุกต์ใช้โอโซนในงานด้านอื่นๆ   | 19 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย  |    |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง   | 20 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง  | 20 |
| 3.3 แหล่งที่มาของตัวอย่างน้ำเสีย  | 21 |
| 3.4 การดำเนินการทดลอง   | 21 |
| 3.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซน  | 21 |
| 3.4.2 การบำบัดน้ำเสียด้วย $O_3$ และ $O_3/H_2O_2$  | 23 |
| 3.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด   | 25 |
| 3.5 วิธีการวิเคราะห์  | 25 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์  |    |
| 4.1 คุณสมบัติของน้ำเสีย   | 26 |
| 4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน   | 26 |
| 4.3 ผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว  | 27 |
| 4.3.1 ผลของพีเอชต่อการบำบัดค่าซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมัน<br>และน้ำมัน และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด | 28 |
| 4.3.2 ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัดที่พีเอช 4 7 และ 9   | 30 |
| 4.3.3 ผลของเวลาต่อการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9  | 31 |
| 4.4 ผลการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์  | 34 |
| 4.4.1 ผลของปริมาณ $H_2O_2$ ต่อการบำบัดด้วย $O_3/H_2O_2$   | 35 |
| 4.4.2 ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัดด้วย $O_3/H_2O_2$  | 38 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ  |    |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย  | 39 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการค้นคว้าวิจัยขั้นต่อไป  | 40 |
| บรรณานุกรม  | 41 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| ภาคผนวก   |      |
| ภาคผนวก ก คุณสมบัติของน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน | 44   |
| ภาคผนวก ข การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน     | 46   |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการวิจัย                        | 50   |
| ภาคผนวก ง การทดสอบข้อมูลทางสถิติ                  | 52   |



## สารบัญตาราง

|              | หน้า   |    |
|--------------|--|----|
| ตารางที่ 2.1 | คุณสมบัติของน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน  | 5  |
| ตารางที่ 2.2 | มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากสถานีบริการน้ำมันในประเทศไทย                                      | 6  |
| ตารางที่ 3.1 | สมภาวะที่ใช้บำบัด  | 23 |
| ตารางที่ 3.2 | วิธีการวิเคราะห์   | 25 |
| ตารางที่ 4.1 | คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์  | 26 |
| ตารางที่ 4.2 | ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน  | 27 |
| ตารางที่ 4.3 | ผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่เวลา 1.5 ชั่วโมง<br>พีเอช 4 7 และ 9                 | 28 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9<br>เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง             | 31 |
| ตารางที่ 4.5 | อัตราการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9  | 33 |
| ตารางที่ 4.6 | ผลการบำบัดด้วย $O_3/H_2O_2$ ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง                                  | 34 |
| ตาราง ก-1    | รายงานการวิเคราะห์น้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน 48 แห่ง                                    | 44 |
| ตาราง ก-2    | ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของทุกพารามิเตอร์ที่ได้<br>จากสถานีบริการน้ำมัน 48 แห่ง  | 45 |
| ตาราง ข-1    | ผลการทำกราฟมาตรฐาน   | 46 |
| ตาราง ข-2    | ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน  | 48 |
| ตาราง ข-3    | ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้  | 49 |
| ตาราง ค-1    | คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์  | 50 |
| ตาราง ค-2    | ข้อมูลผลการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว  | 50 |
| ตาราง ค-3    | ข้อมูลผลการบำบัดน้ำเสียด้วย $O_3/H_2O_2$   | 51 |
| ตาราง ง-1    | การทดสอบสมมติฐานการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว<br>ที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพีเอช 4 7 และ 9   | 52 |
| ตาราง ง-2    | การทดสอบสมมติฐานการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว<br>พีเอช 9 เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง | 53 |
| ตาราง ง-3    | การทดสอบสมมติฐานการบำบัดด้วย $O_3/H_2O_2$<br>ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง                 | 54 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|        |  | หน้า |
|--------|--|------|
| รูปที่ | 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องผลิตโอโซน  | 13   |
| รูปที่ | 2.2 ผลที่ได้จากการแปรค่าอัตราการผลิตของออกซิเจน  | 13   |
| รูปที่ | 2.3 แผนภาพของปฏิกิริยา เมื่อเติมโอโซนในสารละลาย  | 17   |
| รูปที่ | 2.4 การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนและปฏิกิริยาการย่อยสลายของโอโซน  | 17   |
| รูปที่ | 3.1 เครื่องผลิตโอโซน   | 22   |
| รูปที่ | 3.2 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน  | 22   |
| รูปที่ | 3.3 ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือบำบัดน้ำเสียด้วย $O_3$ และ $O_3/H_2O_2$                                 | 23   |
| รูปที่ | 3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย   | 24   |
| รูปที่ | 4.1 กราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน  | 27   |
| รูปที่ | 4.2 สารละลายที่ผ่านการตกโอโซน  | 27   |
| รูปที่ | 4.3 กราฟแสดงผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว<br>ที่เวลา 1.5 ชั่วโมง พีเอช 4 7 และ 9              | 29   |
| รูปที่ | 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว<br>ที่เวลา 1.5 ชั่วโมง พีเอช 4 7 และ 9  | 29   |
| รูปที่ | 4.5 กราฟแสดงผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว<br>ที่พีเอช 9 เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง          | 32   |
| รูปที่ | 4.6 กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว<br>ที่พีเอช 9 เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง | 32   |
| รูปที่ | 4.7 กราฟแสดงผลการบำบัดด้วย $O_3/H_2O_2$ ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง                                | 35   |
| รูปที่ | 4.8 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการบำบัดด้วย $O_3/H_2O_2$ ที่พีเอช 9                                     | 37   |
| รูปที่ | 4.9 ลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัด  | 38   |
| รูป    | ข-1 กราฟมาตรฐาน(1)   | 46   |
| รูป    | ข-2 กราฟมาตรฐาน(2)   | 47   |
| รูป    | ข-3 กราฟมาตรฐาน(3)   | 47   |
| รูป    | ข-4 กราฟมาตรฐาน(4)   | 49   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| $O_3$        | = | โอโซน   |
| $H_2O_2$     | = | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์  |
| $O_3/H_2O_2$ | = | โอโซนควบคู่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์                               |
| $O_2$        | = | ออกซิเจน  |
| UV           | = | รังสีอัลตราไวโอเล็ต   |
| pH           | = | พีเอช   |
| COD          | = | ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์          |
| BOD          | = | ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ |
| TSS          | = | ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด                                   |
| KI           | = | โพแทสเซียมไอโอไดด์  |
| PAHs         | = | พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน                               |
| N            | = | นอร์มัล   |
| M            | = | ไมลารีตี  |
| LAS          | = | Linear Alkylbenzene Sulfonate                                 |
| mg           | = | มิลลิกรัม   |
| mg/L         | = | มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| mmol         | = | มิลลิโมล  |
| ppm          | = | ส่วนในล้านส่วน  |
| hr           | = | ชั่วโมง   |
| %            | = | เปอร์เซ็นต์   |
| มก.          | = | มิลลิกรัม   |
| มล.          | = | มิลลิลิตร   |
| มก./ล.       | = | มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| ก./มล.       | = | กรัมต่อมิลลิลิตร  |
| ก./ล.        | = | กรัมต่อลิตร   |
| ลบ.ม.        | = | ลูกบาศก์เมตร  |
| มม.          | = | มิลลิเมตร   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

สถานีบริการน้ำมันทั่วประเทศมีทั้งหมด 13,260 แห่ง อยู่ภายใต้เครื่องหมายการค้า 7,078 แห่ง เป็นสถานีอิสระ 6,171 แห่ง (สรุปข่าวพลังงาน 24(10), 2541) ซึ่งถือได้ว่าเป็นผู้บริโภคน้ำมันรายใหญ่รายหนึ่งเนื่องจากในแต่ละสถานีบริการน้ำมันมีความจำเป็นต้องใช้น้ำมันจำนวนมากเพื่อประกอบกิจการในแต่ละวัน ได้แก่ การทำความสะอาดพื้น ห้องน้ำ ล้างรถ และการล้างทำความสะอาด เครื่องมือ เป็นต้น ในสถานีบริการน้ำมันขนาดใหญ่จะมีกิจการอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น กิจการร้านอาหาร ร้านค้า และมีบริการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง ซึ่งเป็นเหตุให้มีปริมาณน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น น้ำทิ้งดังกล่าวจะประกอบด้วย น้ำมัน ไขมัน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่งตามปกติจะถูกปล่อยทิ้งไปทางท่อระบายน้ำ จึงถือได้ว่าสถานีบริการน้ำมันเป็นแหล่งก่อกมลภาวะทางน้ำที่สำคัญแห่งหนึ่ง ดังนั้นหากมีการจัดการให้มีการบำบัดขั้นต้นก่อนปล่อยลงสู่ท่อระบายน้ำจะเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหามลภาวะทางน้ำได้ และเป็นการแบ่งเบาภาระในการบำบัดน้ำเสียของรัฐบาลลงได้ อีกทั้งยังสามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ ได้อีก จึงถือเป็นการตอบสนองนโยบายประหยัดน้ำของรัฐบาลได้ดี

การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ไม่แพงนัก (J.L. Colodette *et al.*, 1993) ใช้พลังงานไม่มาก แต่มีประสิทธิภาพในการ ออกซิไดซ์ สารต่าง ๆ ได้สูง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เมื่อปี 1903 มีการใช้ โอโซนในการฆ่าเชื้อโรค และลดสีสำหรับกิจการน้ำดื่ม มีการใช้โอโซนในการทำความสะอาดสระว่ายน้ำแทนการใช้คลอรีน และใช้ลดกลิ่นในอากาศ (Lagrega, 1994) มีการวิจัยอย่างกว้างขวางสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งอื่น ๆ เช่น การลดค่าซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ (J.C. Hostachy *et al.*, 1997) และเคยมีการวิจัยในเรื่องการบำบัดน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันโดยใช้โอโซนควบคู่ไปกับการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลาย (Kornsitthikul, 1998) พบว่าในขั้นตอนการใช้โอโซนสามารถลดค่าซีโอดี ปริมาณน้ำมันและไขมันได้ดี แต่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดนาน มีงานวิจัยที่ใช้สารออกซิไดซ์ 2 ชนิดควบคู่กันไป คือ ใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์( $H_2O_2$ ) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายแอทราซีน(Atrazine) พบว่าได้ผลดีกว่าใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว (Langlais, 1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิจัยนี้ศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์( $H_2O_2$ )ควบคู่ไปกับโอโซน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโอโซนและลดเวลาในการบำบัด

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซน
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซน โดยใช้ Spectrophotometric method (APHA, 1995) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิจัย
2. ทดสอบหาสภาวะที่ดีที่สุด ในการบำบัดโดยการใช้อโอโซนเพียงอย่างเดียว โดยแปรค่าพีเอช (4, 7, 9) และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด (0.5, 1.0, 1.5 ชั่วโมง)
3. บำบัดโดยใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยแปรค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (0.025, 0.05, 0.08, 0.1, 0.15 มิลลิโมล) โดยใช้ พีเอชและระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ2

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

1. สร้างชุดอุปกรณ์และเครื่องมือบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน
2. ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซนโดยใช้ Spectrophotometric method เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัด
3. สังเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย
4. นำตัวอย่างน้ำเสียมาวิเคราะห์หาค่าซีโอดี บีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และ ปริมาณไขมันและน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการบำบัดโดยใช้ไอโซนเพียงอย่างเดียว และใช้ไอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
6. นำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงในข้อ 4.
7. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไอโซนเพียงอย่างเดียวกับการบำบัดโดยใช้ไอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้ไอโซนเพียงอย่างเดียว
2. ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้ไอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. ทราบถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวิธีการดังกล่าวมาบำบัดน้ำเสียและสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 น้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน

##### 2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมัน

ไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันแบ่งเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล ดังนี้

1. อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ สารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นโซ่เปิด ซึ่งเป็นโซ่ตรงหรือโซ่แขนง โดยมีอะตอมของคาร์บอนต่อกับคาร์บอนด้วยพันธะโคเวเลนต์ ชนิดพันธะเดี่ยวพันธะคู่ หรือพันธะสาม หรือปนกันก็ได้ เช่น บิวเทน เฮกเซน เป็นต้น

2. อะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ สารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นวง โดยที่อะตอมของคาร์บอนต่อกับคาร์บอนด้วยพันธะเดี่ยวหรือพันธะคู่ ขนาดของวงมีตั้งแต่จำนวนคาร์บอน 3 คาร์บอนจนถึง 9 คาร์บอน หรือมากกว่า เช่น ไสโคโลโพรเพน ไสโคโลบิวเทน เป็นต้น

3. อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นสารประกอบที่มีอะตอมของคาร์บอนต่อกันเป็นวงมี  $\pi$ อิเล็กตรอน จำนวน  $4n+2$  (เมื่อ  $n$  คือ เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ เช่น 0, 1, 2,...) มีโครงสร้างเป็นรูปแบนราบ และ  $\pi$ อิเล็กตรอนนี้มีการเคลื่อนที่เป็นวง และแต่ละอะตอมในวงมักเป็น  $sp^2$ -ไฮบริไดซ์ (กัทนล, 2537)

## 2.1.2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันในกรุงเทพมหานคร

| รายชื่อสถานีบริการน้ำมัน | พารามิเตอร์ |                       |                              |                                  |
|--------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                          | พีเอช       | ค่าซีโอดี<br>(มก./ล.) | ปริมาณสารแขวนลอย<br>(มก./ล.) | ปริมาณน้ำมันและไขมัน<br>(มก./ล.) |
| พีทีที (PTT)             | 7.4         | 251.2                 | 187.6                        | 44.4                             |
| เชลล์ (Shell)            | 7.3         | 139.4                 | 225.8                        | 54.1                             |
| เอสโซ่ (Esso)            | 6.9         | 301.6                 | 218.0                        | 31.6                             |
| บีพี (Bp)                | 7.6         | 152.0                 | 53.0                         | 4.0                              |
| โมบิล (Mobil)            | 7.0         | 375.0                 | 85.0                         | 6.0                              |
| พีที (PT)                | 6.8         | 86.0                  | 30.0                         | 36.0                             |
| ซัสโก้ (Susco)           | 7.7         | 252.0                 | 370.0                        | 119.0                            |
| คาลเท็กซ์ (Caltex)       | 7.4         | 228.8                 | 181.4                        | 30.8                             |

ที่มา : Chumnumsiriwattana, 1991

## 2.1.3 ผลกระทบของน้ำมันต่อสิ่งมีชีวิต

สามารถแบ่งผลกระทบที่จะเกิดต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. **ผลกระทบทางกายภาพ** ได้แก่ การที่มีการจับติดของคราบน้ำมันบนตัวสัตว์ เช่น ตามขนของนกทะเล ทำให้นกหมดสภาพที่ดีในการบิน การพักผ่อน และการดำน้ำหาอาหาร เป็นต้น นอกจากนั้นจะพยายามใช้จงอยปากในการใช้ความสกปรกออกทำให้กลิ่นน้ำมันเข้าไปส่วนหนึ่งเป็นสาเหตุให้นกตายได้ คราบน้ำมันที่เคลือบเป็นแผ่นฟิล์มบนผิวน้ำทำให้สัตว์บางชนิดสำคัญตายได้ และยังเป็นตัวการลดปริมาณแสงที่ส่องผ่านน้ำลงไป มีผลต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในน้ำ เป็นเหตุให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลงได้ (วัฒยากร, 2531)

การที่ปริมาณออกซิเจนลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นเหตุให้ปลาและสัตว์น้ำอื่นๆในบริเวณนั้นได้รับผลกระทบ คราบน้ำมันมีกลิ่นเหม็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 5 ข้ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกปรก นอกจากนี้ยังทำให้รสและกลิ่นของน้ำเปลี่ยนแปลงไป มีผลทำให้สัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นๆ มีรสและกลิ่นเปลี่ยนไปด้วย (เมนะเศวต, 2534)

2. ผลกระทบทางเคมี ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันนั้นๆ ดังนี้

- 1) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีจุดเดือดต่ำ เป็นพวกที่ระเหยง่ายจะมีผลในการทำให้สัตว์สลบ หรือเกิดอาการมึนงงได้
- 2) สารประกอบPAHs บางตัว เช่น 3,4 benzopyrene และ 1,2 benzanthracene เป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และเนื้องอกได้
- 3) สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ที่มีจุดเดือดต่ำ เป็นพวกที่มีความเป็นพิษสูงสุดและละลายน้ำได้ดีที่สุด เช่น เบนซีน โทลูอีน แนพทาลิน และฟีนแอนทรีน สารพวกนี้จะมีผลในการยับยั้งการสร้างเม็ดเลือดมีผลต่อระบบหายใจ มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลางในสัตว์ นอกจากนี้ยังอาจเป็นสารก่อลูกวิรูป และสารก่อมะเร็งด้วย (วัธมยากร, 2531) พิษของเบนซีนจะมีผลต่อลูกปลาขณะฟักน้ำจืด ทำให้เกิดอาการกล้ามเนื้อตาย เกิดพิษต่อระบบประสาท เกิดการขาดออกซิเจน เพราะน้ำมันจะเข้าไปทำลายระบบการขนถ่ายของออกซิเจนในร่างกาย (เมนะเศวต, 2538)

#### 2.1.4 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากสถานบริการน้ำมัน

ตารางที่ 2.2 แสดงมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากสถานบริการน้ำมันในประเทศไทย

| พารามิเตอร์                 | หน่วย  | ค่าที่ยอมรับได้ |
|-----------------------------|--------|-----------------|
| พีเอช                       | -      | 5-9             |
| ค่าบีโอดี                   | มก./ล. | 20              |
| ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด | มก./ล. | 150             |
| ปริมาณตะกั่ว(Pb)            | มก./ล. | 0.2             |
| ปริมาณน้ำมัน                | มก./ล. | 15              |

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2537

## 2.2 การกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง

### 2.2.1 หลักการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง

#### 1. การรวมตะกอน (Coagulation)

การรวมตะกอน(coagulation)คือ การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดประมาณ $10^{-5}$ - $10^{-7}$  เซนติเมตร ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียสามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากประจุที่ล้อมรอบอนุภาคเหล่านี้ ส่วนใหญ่เป็นประจุลบดังนั้นจึงมีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยทำลายประจุที่ล้อมรอบอนุภาค เช่น การเติมเฟอริกคลอไรด์( $FeCl_3$ ) และสารส้ม(Alum)เป็นต้น (Barnhart, 1971)

#### 2. การดูดซับ (Adsorption)

สารอินทรีย์ในน้ำเสียสามารถกำจัดออกได้โดยใช้เทคนิคการดูดซับ ซึ่งสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกตัวกลางดูดซับเอาไว้บนพื้นผิว

การจัดสรรปนเปื้อนออกจากสารละลายในกระบวนการดูดซับนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และคุณสมบัติทางเคมี ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวดูดซับ (adsorbent) และชนิดของสารปนเปื้อน อัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารปนเปื้อน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และการลดลงของประจุบนผิวหน้าของตัวดูดซับ นอกจากนี้อัตราการดูดซับยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สัมผัสกับตัวดูดซับอีกด้วย ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)เป็น ตัวดูดซับที่นิยมใช้มากที่สุด (Barnhart, 1971)

#### 3.การลอยตัว (Flotation)

การลอยตัวใช้ในการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำ น้ำมันและไขมันในน้ำเสียซึ่งเป็นการแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง ความสามารถในการลอยตัวขึ้นอยู่กับอากาศอย่างเหมาะสม (Barnhart, 1971)

API gravity separator เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมาหลายทศวรรษ แต่ยังไม่สามารถกำจัดอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กได้อย่างสมบูรณ์ มีการรายงานประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันจะอยู่ในช่วง 50-90 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลเข้าและปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเป็นปัจจัยสำคัญในการแยกน้ำมัน

วิธีการลอยตัวโดยใช้อากาศเป่า (dissolved air flotation) ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นเป็นเทคนิคการแยกน้ำมันออกจากน้ำ (oil – water separation) ตามแบบ API gravity separation ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและโรงกลั่นน้ำมัน กระบวนการพื้นฐานคือให้ความดันแก่น้ำเสียที่ไหลเข้าระบบหรือน้ำเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่ อากาศจะถูกละลายภายใต้ความดัน 2.8 – 4.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีการลดความดันผ่านวาล์วต่อไปยังบ่อน้ำเสีย อากาศผ่านเข้าไป และก่อตัวเป็นฟองอากาศผ่านขึ้นมาสู่อากาศทำให้น้ำมันลอยแผ่อยู่บนผิวน้ำ (American Petroleum Institute, 1969)

#### 4. การกรอง (Filtration)

ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการที่จะใช้เส้นใยสังเคราะห์ในการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง สารสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบได้แก่ ไนลอน (nylon) เดครอน (dacron) โพลีโพรพิลีน (polypropylene) และ เส้นใยอะคริลิก (acrylic fibers) ในขนาดต่าง ๆ กัน พบว่าน้ำมันสามารถดูดซับบนเส้นใยได้ดี ผลที่ได้จากกระบวนการกรองเพื่อแยกน้ำและน้ำมันออกจากกัน (oil in-water, O/W) คือมีการแตกตัวของน้ำมันในระหว่างที่กรองผ่านตัวกลางทำให้เกิดการแยกชั้นขึ้น หากอนุภาคน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้และอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่า 40 มิลลิเมตร แสดงอยู่ในระดับที่มีนัยสำคัญ การเติมพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolytes) อาจช่วยในการบำบัดได้ (American Petroleum Institute, 1969)

#### 5. เทคนิคการแยกน้ำมันโดยใช้แผ่นโลหะที่ลาดเอียง (Tilted Plate Separation)

เทคนิคการแยกน้ำมันโดยใช้แผ่นโลหะที่ลาดเอียง (Tilted Plate Separation) เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาจากเทคนิค API separation โดยที่แผ่นโลหะถูกแบ่งเป็นช่องเท่า ๆ กัน และเอียงทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ ทำให้มีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการไหลจึงลดลง น้ำมันที่สะสมอยู่บริเวณด้านล่างของแต่ละแผ่นโลหะ (plate) จะรวมตัวกัน และลอยแผ่อยู่บนพื้นผิว ในทำนองเดียวกันสลัดจ์ที่สะสมอยู่ด้านบนของแผ่นโลหะ จะเลื่อนลงสู่ด้านล่าง

ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันของเทคนิคการแยกน้ำมันโดยใช้แผ่นโลหะที่ลาดเอียง จะอยู่ในช่วง 55- 65 เปอร์เซ็นต์ (American Petroleum Institute, 1969)

## 2.2.2 วิธีการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง

วิธีการกำจัดคราบน้ำมัน โดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้ 3 วิธีร่วมกัน จึงจะทำได้สมบูรณ์ คือ

1. **วิธีทางกายภาพ** เช่น การใช้ฟู่กวาดน้ำมัน การใช้เครื่องดูดน้ำ การใช้สารดูดซับน้ำมัน การใช้ตาข่ายดักน้ำมัน เพื่อจะกำจัดน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ วิธีนี้จะได้ดีเฉพาะในบริเวณน้ำนิ่งเท่านั้น

2. **วิธีทางเคมี** เช่น การใช้สารกระจายตัว หรือ สารตกตะกอน ซึ่งสารเคมีนี้จะราคาแพงสิ้นเปลืองมาก และยังเป็นพิษต่อสัตว์ ซ้ำยังทำให้เกิดปัญหามลภาวะ ซึ่งต้องติดตามกำจัดในภายหลัง

3. **วิธีทางชีวภาพ** แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1) การย่อยสลายโดยธรรมชาติ (biodegradation) โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติ พัฒนาปรับตัว ย่อยสลายน้ำมันซึ่งจะเป็นไปอย่างช้าๆ และเวลานานกว่าจะกำจัดคราบน้ำมันได้หมด

2) การเร่งธรรมชาติ (bioremediation) วิธีหนึ่งคือ โดยการเพิ่มธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน หรือ ฟอสฟอรัส เพื่อให้เชื้อธรรมชาติเจริญเติบโตขยายจำนวน และย่อยสลายน้ำมันได้ดี อีกวิธีคือ โดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันลงไป วิธีนี้จะสามารถกำจัดคราบน้ำมันได้เร็วกว่าวิธีที่ปล่อยให้ย่อยสลายเองโดยธรรมชาติ (Sukhumavasi *et al.*, 1993)

## 2.3 การใช้โอโซนบำบัดน้ำเสีย

### 2.3.1 คุณสมบัติของโอโซน

โอโซนอยู่ในรูปของออกซิเจน มีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ  $O_3$  ซึ่งไม่เสถียร เป็นก๊าซที่มีสีฟ้า มีกลิ่นเฉพาะตัวสามารถพบได้ในบรรยากาศ เป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง (strong oxidizing agent) สำหรับสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ คุณสมบัติทางกายภาพของโอโซน มีดังต่อไปนี้

มวลโมเลกุล เท่ากับ 47.9982

จุดเดือดที่ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ -111.9 องศาเซลเซียส

จุดเยือกแข็งที่ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ -192.5 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิวิกฤต เท่ากับ -12.1 องศาเซลเซียส

ความดันวิกฤต เท่ากับ 54.6 บรรยากาศ

ความหนาแน่นที่สภาวะก๊าซ ที่ 0 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ 2.143 ก./ล.

ความหนาแน่นที่สภาวะของเหลวที่ -183 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.571 ก./มล.

ความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.144

ความสามารถในการละลายน้ำที่ 0 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ 0.494 เท่าของปริมาตรน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ 0.003 ก./ล. (3 ppm)

(Laclair and Rosen, 1978)

### 2.3.2 ข้อได้เปรียบของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย

#### 1. ประหยัดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาโอโซนในเซชั่น (Ozonization)

โดยทั่วไปโอโซนสามารถละลายได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นปฏิกิริยาโอโซนในเซชั่นของโอโซนในน้ำเสียจึงเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ระบบจึงไม่ต้องเสียพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Masten and Davies, 1994)

#### 2. ง่ายและสะดวกต่อการสลายโอโซนที่เหลือจากการใช้งาน

เนื่องจากโอโซนมีวงจรชีวิตสั้นจึงทำให้โอโซนสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย

#### 3. โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง

เนื่องจากโอโซนมีค่าศักย์ออกซิเดชันสูงกว่าคลอรีน 1.52 เท่า จึงสามารถออกซิไดซ์สารประกอบเคมีที่มีพิษในน้ำได้ดีกว่าคลอรีน โดยสามารถออกซิไดซ์ได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ (Masten and Davies, 1994)

#### 4. สามารถกำจัดสีได้

ในสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นโพลีไซคลิก (Polycyclic) บางตัวที่มีหมู่โครโมฟอร์ คือหมู่ฟังก์ชันกรุปที่ไม่อิมตัวซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ (UV visible) ได้ ทำให้สารประกอบที่มีหมู่โครโมฟอร์นี้ให้สีได้ เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์หมู่โครโมฟอร์ โดยจะเข้าไปทำลายพันธะคู่ ทำให้โอโซนสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้

### 5. สามารถกำจัดกลิ่นได้ดี

ในสารประกอบบางตัวจะมีกำมะถันและไนโตรเจนซึ่งเป็นสารมีกลิ่นเหม็น ทำให้สามารถกำจัดกลิ่นในน้ำเสียได้ เช่น  $H_2S + 2O_3 \rightarrow H_2SO_4 + O_2$

### 6. ควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ (Algae) ได้

โอโซนสามารถกำจัดพืชน้ำได้ทางอ้อมโดยจะออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ที่เป็นอาหารของมัน ทำให้พืชน้ำหยุดการเจริญเติบโตและตายในที่สุด

### 7. สามารถแยกสารของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) ออกได้

โอโซนจะทำให้ผิวหน้าประจุเป็นกลาง อนุภาคต่างๆก็จะลอยขึ้นมารวมเป็นกลุ่ม ทำให้ง่ายต่อการแยกต่อไป

### 8. มีความปลอดภัย ออกซิไดส์แล้วจะไม่เกิดสารประกอบที่เป็นพิษ

## 2.3.3 ระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้โอโซน

### 1. ส่วนบำบัดอากาศ (Feed gas treatment)

เป็นหน่วยจำหน่ายอากาศไปหน่วยสร้าง จะมีการจำกัดอนุภาคแปลกปลอม ละออง ความชื้นและสารไฮโดรคาร์บอนก่อน อนุภาคที่ใหญ่กว่า 0.3 ไมครอน จะถูกกำจัดโดยการอัดความดัน จากนั้นนำไปกรองและอบแห้ง

### 2. ส่วนสร้างโอโซน (Ozone generation)

จะสร้างโอโซนจากออกซิเจน โดยใช้เครื่องกำเนิดโอโซนแบบโคโรนาดีสชาร์จ (Corona-discharge ozone generator) คือ การป้อนออกซิเจนเข้าระหว่างอิเล็กโทรด 2 ตัวที่ความต่างศักย์สนามไฟฟ้าสูง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงระหว่างช่องว่างของอิเล็กโทรด ข้อควรระวังคือ 80% ของพลังงานที่ให้เซลล์จะกลายเป็นความร้อนอาจทำให้โอโซนสลายตัวได้ จึงควรมีเครื่องทำความเย็นอยู่ด้วย

### 3. ส่วนผสมโอโซนกับน้ำเสีย (Ozone contact)

เป็นหน่วยที่เกิดปฏิกิริยาโอโซนในเซชัน โอโซนกับน้ำเสียจะผสมกันโดยวิธีการ เช่น เทอร์ไบน์ (turbine) ตัวกระจายอากาศ(diffusers) และ อินเจกชัน (injection) เป็นต้น

### 4. ส่วนทำลายโอโซน (Ozone Destruction)

เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถกัดกร่อนโลหะและเป็นอันตรายต่อมนุษย์เมื่อได้รับเข้าไป 100-200 ppm จึงต้องทำให้ความเข้มข้นเหลือ 0.1 ppm ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ วิธีการทำลายมีหลายวิธี คือ

- นำกลับมาใช้ซ้ำ (reinjection)
- การใช้ความร้อนทำให้สลายตัว (Autodecomposition)
- การทำให้เจือจางกับอากาศ (dilution)
- เร่งให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับโลหะออกไซด์ (Catalytic reduction with metal oxide)

โอโซนเป็นก๊าซที่มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สูงจึงเป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำสำหรับดื่ม และสระว่ายน้ำร่วมกับเครื่องกรองถ่านเพื่อช่วยดูดซับสารพิษหรือโลหะที่ละลายอยู่ในหมัดไป นอกจากนี้ยังสามารถฆ่าเชื้อโรคโดยไม่ขึ้นกับพีเอชของน้ำ

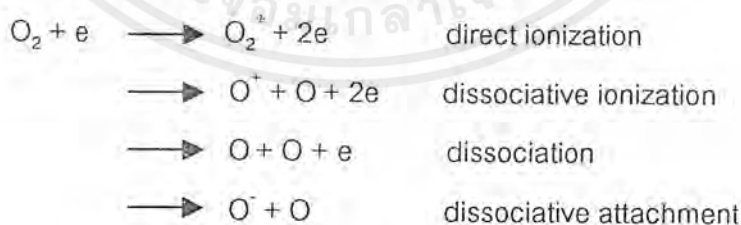
### 2.3.4 การผลิตโอโซน

ในทางเคมีเนื่องจากโอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียรสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องผลิตในระบบ วิธีที่จะผลิตโอโซนให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในปัจจุบัน คือใช้ electrical corona discharge (Melcaf & Eddy, 1991)

เครื่องมือที่ออกแบบเพื่อผลิตโอโซนแสดงใน รูปที่ 2.1 โอโซนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นออกซิเจนอย่างรวดเร็วแปรผันตามความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น

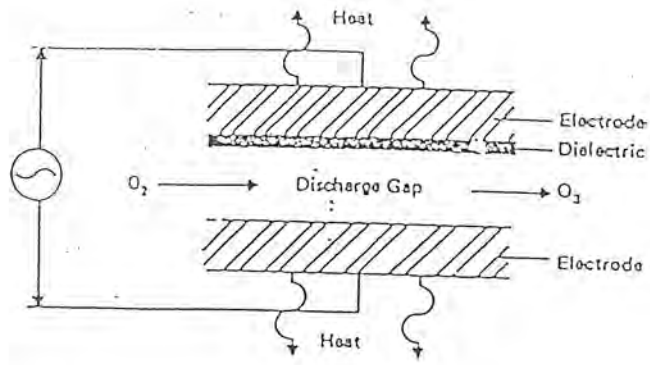
ตัวโครงสร้างโอโซนแบบพื้นฐาน แรงดันไฟฟ้าจะถูกป้อนให้อิเลคโตรดทั้งสองขั้วที่มีไดอิเล็กตริกและช่องอากาศคั่นอิเลคโตรดทั้งสองอยู่ อากาศจะถูกดูดผ่านช่องอากาศนี้และจะเกิดการแตกตัวของอากาศเนื่องจากเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจนอิเลคโตรดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ออกซิเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นโอโซนตามขั้นตอนดังนี้

1. Oxygen-free radicals are generated by ionic process



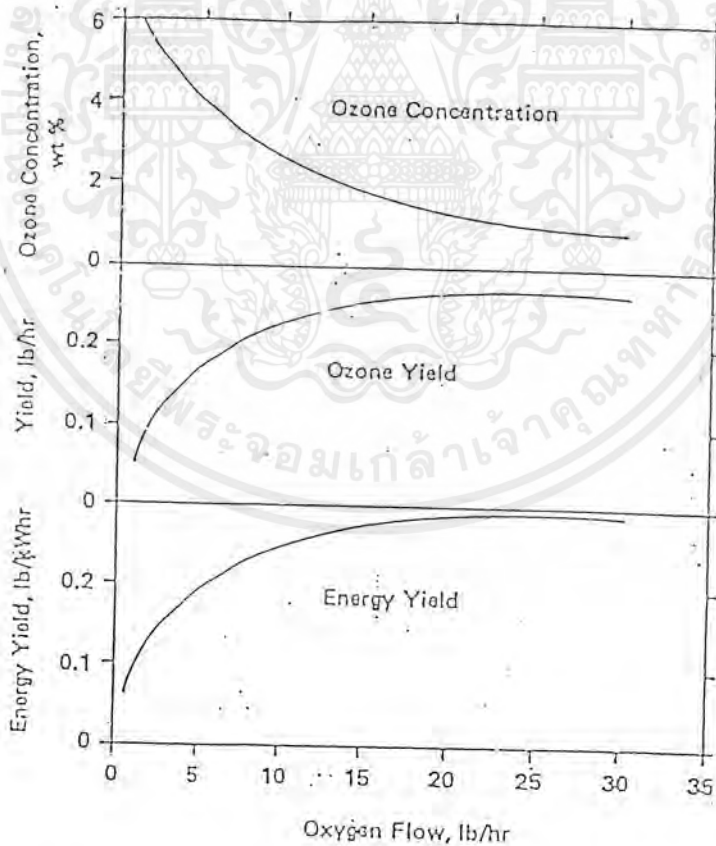
2. Ozone is generated by free radical reaction:





รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องผลิตโอโซน (Laclair and Rosen, 1978)

ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นในเครื่องผลิตโอโซน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าใน discharge space ถ้าความเข้มข้นของโอโซน และ อุณหภูมิคงที่ รูปที่ 2.2 แสดง ผลของการไหลของออกซิเจนต่อความเข้มข้นของโอโซน ozone yield และ energy yield ของเครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.2 ผลที่ได้จากการแปรค่าอัตราการไหลของออกซิเจน (Laclair and Rosen, 1978)

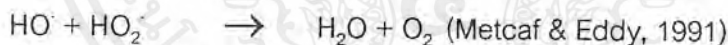
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5 บทบาทของโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย

โอโซนสามารถออกซิไดซ์สารประกอบที่มีความเป็นพิษในน้ำประปาได้ เช่น การกำจัดสี กลิ่น และรสจากพวก แมงกานีส(II) เหล็ก(II) และสารประกอบฟีนอล ในการทำน้ำประปาอาจมีการบำบัดขั้นต้นด้วยโอโซน ซึ่งทำให้เกิดการรวมตะกอน เพื่อลดปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมในน้ำดิบ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้โอโซนในเทคนิคการกรอง (filtration) เพื่อเพิ่มอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพในตัวกรอง (filter) ซึ่งสามารถขจัดสารอินทรีย์และไตรฮาโลมีเทน (THM)

นอกจากนี้การใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียนำไปสู่การพัฒนาที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีรายงานว่า การใช้โอโซนสลายพวกฮิวมิกทำให้เกิดเป็นสารที่มีหมู่ ไฮดรอกซิล-กรุป (-OH) ซึ่งเพิ่มความเป็นขั้วและทำให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าสารตั้งต้น โอโซนสามารถทำลายพันธะของสารประกอบเชิงซ้อนพวกโลหะอินทรีย์ (organometallic) ทำให้ไอออนของโลหะเป็นอิสระ โอโซนสามารถเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ดังนั้นจึงเกิดการรวมตัวกันได้รวดเร็วและถูกกำจัดไปได้หลังจากผ่านขั้นตอนการกรอง

ปฏิกิริยาของโอโซนอธิบายได้ดังสมการ



อนุมูลอิสระในรูปไฮโดรเปอร์ออกไซด์-เรดิคัล ( $HO_2^{\cdot}$ ) และไฮดรอกซิล-เรดิคัล ( $HO^{\cdot}$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคและ เป็นตัวออกซิไดซ์สารปนเปื้อนอื่น ๆ ในน้ำเสียอีกด้วย

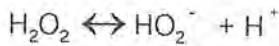
โอโซนถูกนำมาใช้ในการค้าเพื่อทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ การบำบัด (รวมถึงการฆ่าเชื้อโรค) ในน้ำเสียเทศบาล การเตรียมสารเคมี การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม การขจัดกลิ่นแก๊สที่ถูกปล่อยสู่บรรยากาศ และใช้ในการถนอมอาหาร (Laclair and Rosen, 1978)

### 2.3.6 การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย

การเพิ่มความสามารถของโอโซนในการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ มีอยู่ 2 วิธี

1. การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $O_3/H_2O_2$ )

เมื่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ละลายน้ำที่ภาวะสมดุล



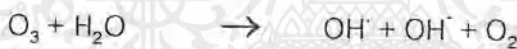
pKa เท่ากับ 11.6

เมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเปอร์ออกไซด์-เรดิคัล ( $\text{HO}_2\cdot$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิล-เรดิคัล ( $\text{OH}\cdot$ ) ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารมลพิษที่มีขนาดเล็ก (micropollutant) ได้

ในการบำบัดน้ำเสียไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) จะช่วยเพิ่มความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกำจัดสารอินทรีย์ อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์-เรดิคัล จะมีค่าประมาณ 0.5 : 1 จากปฏิกิริยาจะเกิดเป็น  $\text{OH}\cdot$  ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่ดีที่สุด เมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ที่สลายตัวยากแล้วเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเพิ่มการส่งผ่านของมวล (mass transfer) ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

ความเข้มข้นของ  $\text{OH}\cdot$  จะเป็นตัวควบคุมพีเอชซึ่งมีผลต่อการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำ

สมมติฐานที่ 1



สมมติฐานที่ 2



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมตัวกับน้ำจะเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์-ไฮดรอกซิล ( $\text{HO}_2\cdot$ ) ดังสมการ



## 2. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสี UV ( $\text{O}_3/\text{UV}$ )

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสี UV มักใช้ในการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ เช่น สารปราบศัตรูพืช สารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound)

ถึงแม้ว่าสามารถใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสี UV ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีหมู่แฮโลเจน (Organohalides) ได้ แต่การเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดของแฮโลเจนในโมเลกุล ( $\text{CHBr}_3 > \text{CHBr}_2\text{Cl} > \text{CHCl}_3$ )

สรุปได้ว่าปัจจัยในการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย มีดังต่อไปนี้

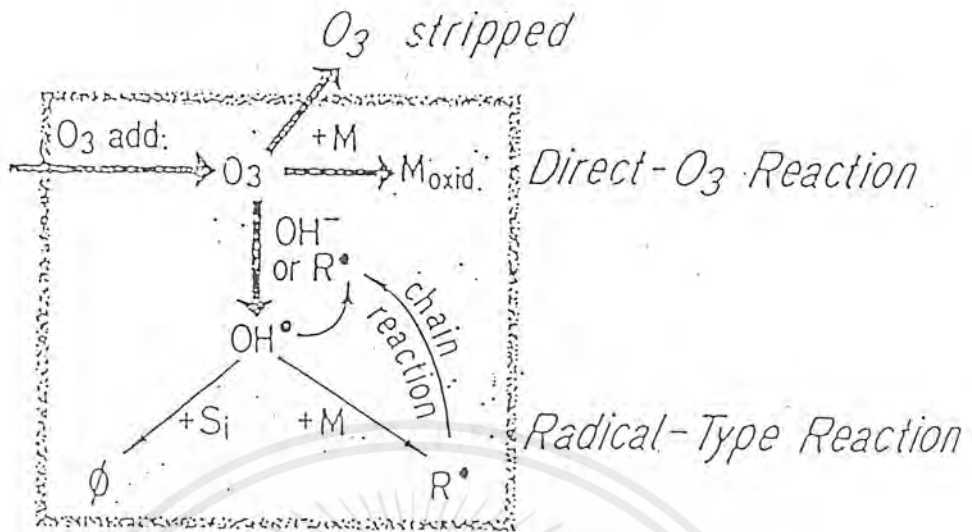
- พีเอช
- อัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมของตัวออกซิไดซ์( $O_3/H_2O_2$ )
- photon flux ในการใช้โอโซนร่วมกับรังสี UV
- ความเข้มข้นของคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนต

(Langlais, 1991)

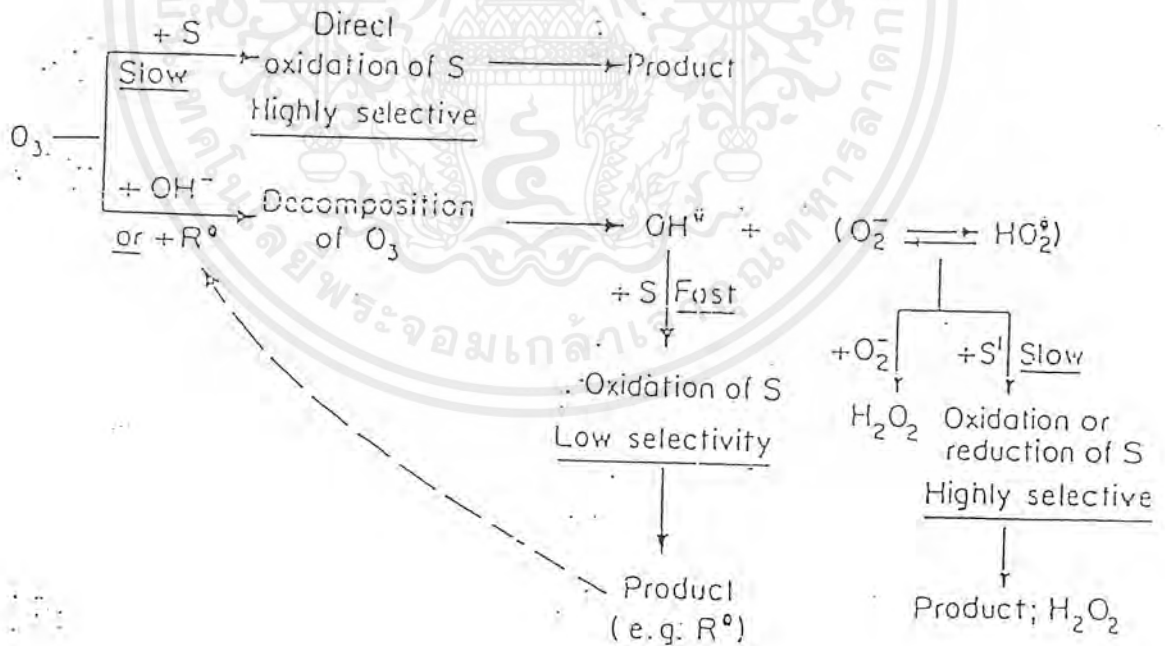
### 2.3.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนในน้ำเสีย

การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนในน้ำเสีย มี 2 กระบวนการ คือ ทางตรง โอโซนทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ หรือ ทางอ้อม ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ เช่น ไฮโดรเปอร์ออกไซด์-เรดิคัล ( $HO_2$ ) และไฮดรอกซิล-เรดิคัล ( $OH$ ) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ การทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์จะมีความเฉพาะเจาะจงสูง ในทางตรงกันข้าม การทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระจะมีประสิทธิภาพในการขจัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่าการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์โดยตรง รูป 2.3 แสดงแผนภาพของปฏิกิริยา เมื่อเติมโอโซนลงในสารละลายอินทรีย์ โอโซนเกิดปฏิกิริยาทางตรงที่พีเอชค่าหนึ่งหรือเกิดปฏิกิริยาแบบทางอ้อมที่พีเอชค่าหนึ่ง โดยโอโซนจะสลายตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ การเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางตรงของโอโซน ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาซึ่งจะส่งเสริม หรือหน่วงปฏิกิริยาการย่อยสลายของโอโซน (Sales, 1992) รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของโอโซน และปฏิกิริยาการย่อยสลายของโอโซน

สารอินทรีย์ป็นป็นอนที่จะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ กับโมเลกุลของโอโซน พวกอะโรมาติกที่เสถียร เช่น ฟีนอล รีคอร์ซินอล (recorcinol) และซาลิซิลเลต (Salicylate) ส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับโอโซน ส่วนสารอินทรีย์ เช่น อะลิฟาติกที่เป็นกรด (aliphatic acids) อัลดีไฮด์ (aldehydes) คีโตน (ketones) ส่วนมากจะเกิดปฏิกิริยาแบบทางอ้อม คือเกิดปฏิกิริยาแบบไม่เฉพาะเจาะจงกับพวกฟรีเรดิคัล ได้แก่ไฮดรอกซิลเรดิคัล สภาวะที่ส่งเสริมปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน เช่น ที่สภาวะเป็นเบส การใช้โอโซนร่วมกับรังสี UV จะเกิดปฏิกิริยากับโอโซนทางอ้อม สภาวะที่เป็นอุปสรรคต่อการสลายตัวของโอโซน ได้แก่ สภาวะที่พีเอชเป็นกรด สภาวะที่มีคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนต จะทำให้ปฏิกิริยาเบี่ยงเบน ไปเกิดเป็นแบบทางตรง



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพของปฏิกิริยาเมื่อเติมโอโซนลงในสารละลาย



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนและปฏิกิริยาการย่อยสลายของโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) หรือไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเปอร์ออกซี-แรดิคัล ( $HO_2$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิล-แรดิคัล ( $OH$ ) ( รูปที่ 2.4 ) ในทางวิศวกรรมมีการประยุกต์โดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจน (Masten and Davies, 1994)

มีการศึกษามากมายที่เกี่ยวข้องกับออกซิเดชันของสารอินทรีย์ โดยใช้ ไฮโดรเจน (Stockinger *et al.*, 1995; Kormmulleret *et al.*, 1997; Gulyas *et al.*, 1994) ตัวอย่างเช่น การศึกษาปฏิกิริยาของไฮโดรเจนกับสารประกอบอะโรมาติก Bentez *et al.* (1997) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ พีเอช และโมเลกุลของไฮโดรเจน ในก๊าซผสมกับกรดฟีนอลิก ( phenolic acids) 8 ชนิด

## 2.4 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจน

### 2.4.1 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน

งานวิจัยที่เคยศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไฮโดรเจน ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน ได้แก่ Gulyas *et al.* (1994) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้ไฮโดรเจนควบคู่กับ  $UV/TiO_2$  ในระบบบำบัดทางชีวภาพ ค่าซีโอดีของน้ำเสียประมาณ 300 มก./ล. ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 5 ชั่วโมงที่ pH เท่ากับ 3 พบว่าสามารถลดค่าซีโอดีได้ประมาณ 70 % และช่วยส่งเสริมการย่อยสลายทางชีวภาพ และเมื่อใช้  $H_2O_2$  ร่วมด้วย โดยใช้ระยะเวลาในการบำบัด 47 นาที พบว่าสามารถลดค่าซีโอดี ได้ประมาณ 17 % และช่วยส่งเสริมการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งกระบวนการทั้งสองมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในระบบบำบัดทางชีวภาพ

Gulyas *et al.* (1995) ศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นโดยการสกัดเอาน้ำมันที่ปนเปื้อนออกจากดินโดยใช้ Super critical water extraction สารละลายที่สกัดได้มีค่า TOC เท่ากับ 320 มก./ ล. เมื่อนำมาบำบัดด้วย  $O_3/H_2O_2$  ในเวลา 1 ชั่วโมงพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 60 %

Komsitthikul (1998) ศึกษาการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนในการบำบัดน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันในระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยใช้ไฮโดรเจนบำบัดขั้นต้น 14.08 mg  $O_3$ /mg  $O_2$  60 นาที ที่ pH เป็นกลาง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด ซีโอดี บีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย และน้ำมันและไขมัน มีค่าเท่ากับ 66.71 % 61.10 % 53.44 % และ 65.59 % ตามลำดับ จากการแปรค่า pH เข้าระบบตะกอนเร่งพบว่าที่ pH ต่ำๆจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

#### 2.4.2 การประยุกต์ใช้โอโซนในงานด้านอื่นๆ

ในอดีต โอโซนใช้ในการฆ่าเชื้อโรค บำบัดรส ควบคุมกลิ่นของน้ำ ใช้บำบัดกรดโอเลอิก (oleic acid) ในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก ใช้ฟอกเยื่อไม้ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ใช้ในอุตสาหกรรมยาและการถนอมอาหาร (Laclair & Rosen, 1978) ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย โดย Van Leeu Wen (1989) ศึกษาการใช้โอโซนบำบัดน้ำทิ้งจากบ้านเรือน พบว่าช่วยลดปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง นอกจากนี้ ความเข้มข้นของโอโซนสูง ๆ สามารถยับยั้งการทำงานของ จุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ตะกอนไม่จมตัว งานวิจัยของ Edwards และ Benjamin (1991) ได้สรุปว่า การใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียขั้นต้น ทำให้ตะกอนเกิดการรวมตัวได้ดี และลดปริมาณการเติมสารที่ทำให้รวมตะกอน (coagulant) ได้ Haeseler *et al.* (1993) ศึกษาการใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อน แนฟทาลีน (naphthalene) ฟีนแอนทรีน (phenanthrene) และไพรีน (pyrene) นอกจากนี้โอโซนมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเอทิลเบนซีน (ethyl benzene) และโทลูอีน (Echegaray & Oliveri, 1994) มีการศึกษาการใช้โอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ในการกำจัดสารปราบศัตรูพืช ได้แก่ แอทราซีน (atrazine) (Orlandini, 1996) ใช้โอโซนกำจัดกรดฮิวมิกและสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำดิบ (Chiang *et al.*, 1995) ใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคัล (Farroq & Misbahudain, 1991)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อMERCK
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้นเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อMERCK
3. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อMERCK
4. แมกนีเซียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อAPS Ajax Finechem
5. สารละลายอัลคาไลน์ - ไอโอไดด์ - เฮไซต์
6. โซเดียมไทโอซัลเฟตเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อMERCK
7. โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อBDH Laboratory
8. แคลเซียมคลอไรด์เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อJ.T. Baker
9. เฟอร์ริกคลอไรด์เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อMERCK
10. กรดบอริกเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อMERCK
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อJ.T. Baker
12. กรดไฮโดรคลอริกเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อBDH Laboratory
13. เฮกเซนเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อBDH Laboratory
14. โพแทสเซียมไบโอเดตเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อMERCK
15. โพแทสเซียมไอโอไดด์เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อJ.T. Baker
16. เกล็ดไอโอดีนเกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อBDH Laboratory
17. น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผลิตไอโซนอาศัย์หลักการ Corona discharge ซึ่งสร้างขึ้นโดยนักศึกษาศาสนันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือบำบัดน้ำเสียด้วยไอโซน
3. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ JENWAY 6405 UV/Vis Spectrophotometer
4. เครื่องชั่งละเอียดแบบ 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Precisa 205A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 20 - อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องมือ Heating Metal ยี่ห้อ Electromal ME cat No.EME6 0250CE
6. เทอร์โมมิเตอร์
7. ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มล. ยี่ห้อ pyrex

### 3.3 แหล่งที่มาของตัวอย่างน้ำเสีย

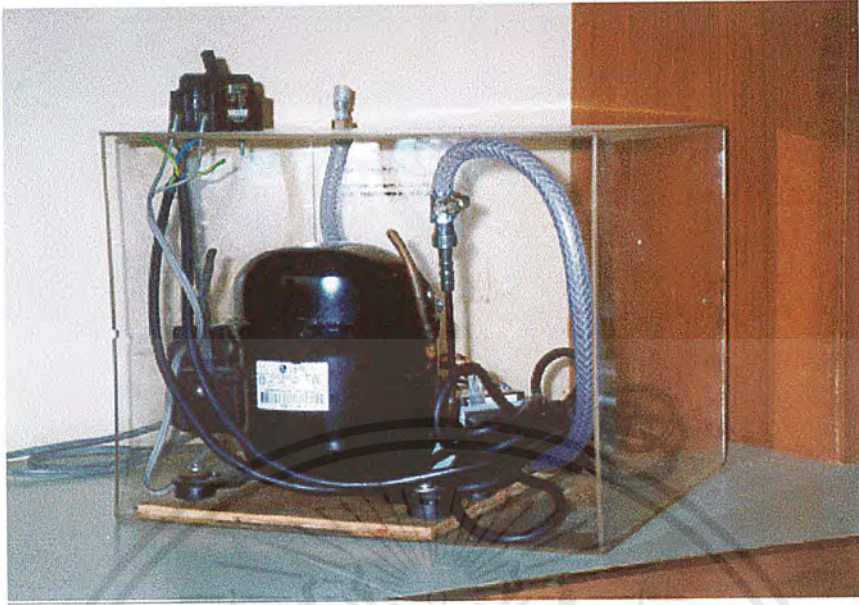
ตัวอย่างน้ำเสียได้มาจากการสังเคราะห์โดยการนำน้ำมันหล่อลื่น 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายดีเทอร์เจนต์(LAS) 2 มิลลิลิตรนำมาทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรจนได้ 300 มิลลิลิตร แล้วกวนผสมให้เข้ากัน

### 3.4 การดำเนินการทดลอง

#### 3.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซน

ระบบบำบัดขนาดเล็ก ประกอบด้วย เครื่องผลิตโอโซนจากก๊าซออกซิเจนแสดงดัง รูปที่ 3.1 ตัวกระจายอากาศ ภาชนะแก้วบรรจุสารละลาย KI ขนาด 0.5 ลิตร 2 ใบสำหรับดักโอโซนและดักโอโซนที่เหลือ จากภาชนะแรก

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซนแสดงดัง รูปที่ 3.2 ทำโดยการดักโอโซนลงในสารละลาย KI 1% ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะแก้วทั้ง 2 ใบ และปั่นกวน 250 รอบต่อนาที เพื่อให้สารละลาย KI สัมผัสกับโอโซนได้ทั่วถึง โดยแต่ละใบบรรจุสารละลาย KI ปริมาตร 300 มล. เพื่อดักโอโซนและดักโอโซนที่เหลือจากภาชนะแรก ดำเนินการตาม Spectrophotometric method (APHA, 1995) โดยทำการแปรค่าระยะเวลาในการดักโอโซนเท่ากับ 20 30 45 และ 80 นาที ตามลำดับ วิเคราะห์หาปริมาณโอโซนทั้งหมดจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร



รูปที่ 3.1 เครื่องผลิตไฮโดรเจน



รูปที่ 3.2 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ-22-องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน และการใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากรูปที่ 3.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว โอโซนที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซนจะถูกส่งไปยังภาชนะขนาด 0.5 ลิตร ซึ่งบรรจุน้ำเสีย 300 มล. โอโซนที่เหลือจากการบำบัดจะผ่านออกมา และถูกดักลงในสารละลาย KI จากนั้นทำการวัดปริมาณโอโซนที่เหลือจากการวัดค่าดูดกลืนแสงโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร

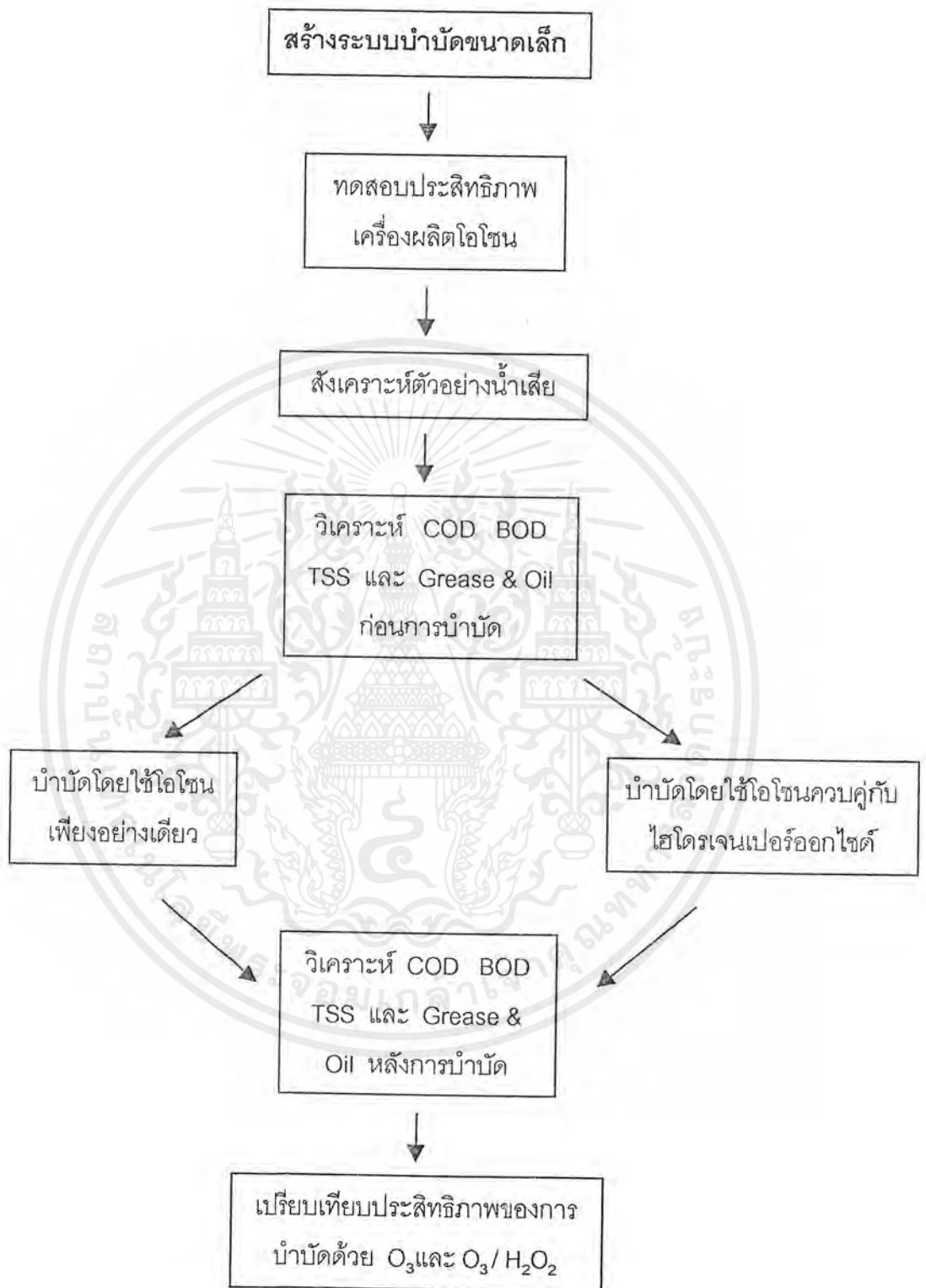
เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว มีการแปรค่าพีเอช และเวลาการบำบัดดัง ตารางที่ 3.1 และในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จาก รูปที่ 3.3 ภาชนะแรกจะบรรจุน้ำเสียและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการบำบัดโดยใช้พีเอช และเวลาการบำบัดที่เหมาะสมจากการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว โดยมีการแปรค่าจำนวนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้บำบัด

| สภาวะที่ใช้บำบัด           | หน่วย    | การแปรค่า                        |
|----------------------------|----------|----------------------------------|
| ค่าพีเอช                   | -        | 4, 7, 9                          |
| เวลาที่ใช้บำบัด            | ชั่วโมง  | 0.5, 1.0, 1.5                    |
| ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ | มิลลิโมล | 0, 0.025, 0.05, 0.08, 0.10, 0.15 |



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือบำบัดน้ำเสียด้วย  $O_3$  และ  $O_3/H_2O_2$



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด

ก่อนการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน และ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เพื่อศึกษาปริมาณสารอินทรีย์พื้นฐานในตัวอย่งน้ำเสีย ในทำนองเดียวกันหลังการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว และการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเปรียบเทียบกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้ก่อนการบำบัด จากนั้นจึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้ง 2 วิธี

ประสิทธิภาพในการบำบัดวัดอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์การกำจัดค่าซีไอดี และ ค่าบีไอดี ปริมาณไขมัน และน้ำมัน และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย ดำเนินตาม Standard methods ( APHA, 1995 ) แสดงดัง ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์

| พารามิเตอร์                    | วิธีการวิเคราะห์               |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. ค่าซีไอดี                   | Opened reflux method           |
| 2. ค่าบีไอดี                   | Azide modification method      |
| 3. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด | Filtration                     |
| 4. ปริมาณไขมันและน้ำมัน        | Partition - Gravimetric Method |
| 5. ปริมาณโอโซน                 | Spectrophotometric method      |
| 6. อุณหภูมิ                    | Thermometer                    |

## บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์

### 4.1 คุณสมบัติของน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยสังเคราะห์โดยใช้ น้ำมันหล่อลื่น 1 มิลลิลิตร และ ดีเทอร์เจนต์ 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการบำบัด แสดงดัง ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

| พารามิเตอร์  | ค่าที่วิเคราะห์ได้ (mg/L) |            |            |        |
|--------------|---------------------------|------------|------------|--------|
|              | ครั้งที่ 1                | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| COD          | 10,168                    | 10,147     | 14,496     | 11,603 |
| BOD          | 980                       | 920        | 800        | 900    |
| Grease & Oil | 1,044                     | 1,151      | 929        | 1,041  |
| TSS          | 368                       | 336        | 340        | 348    |

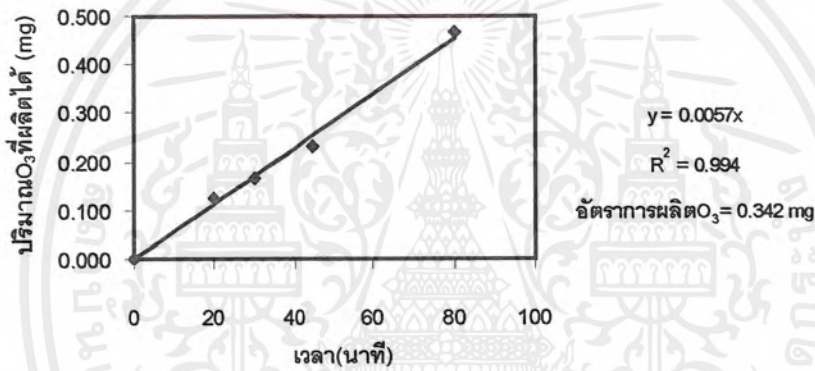
### 4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซน โดยการดักโอโซนลงในสารละลาย KI มีการแปรค่าระยะเวลาในการดักโอโซนเท่ากับ 20 30 45 และ 80 นาที ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ ณ เวลาต่างๆ คำนวณได้จากกราฟมาตรฐานซึ่งแสดงการคำนวณในภาคผนวก ข ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลา 20 30 45 และ 80 นาที แสดงดัง ตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้น แสดงความสัมพันธ์ดัง รูปที่ 4.1 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.994 และสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์  $y = 0.0057x$

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน

| เวลา(นาที) | ปริมาณ O <sub>3</sub> ที่ผลิตได้(mg) |            |            |        |
|------------|--------------------------------------|------------|------------|--------|
|            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 20         | 0.110                                | 0.128      | 0.128      | 0.122  |
| 30         | 0.150                                | 0.184      | 0.164      | 0.166  |
| 45         | 0.240                                | 0.228      | 0.232      | 0.233  |
| 80         | 0.410                                | 0.524      | 0.460      | 0.465  |

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน



รูปที่ 4.2 สารละลายที่ผ่านการดักโอโซน

จากสมการสามารถหาอัตราการผลิตโอโซนต่อชั่วโมงโดยแทนค่า x เท่ากับ 60 นาที  
 ดังนั้นอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซนเท่ากับ 0.342 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่เวลา 1.5 ชั่วโมง พีเอช 4 7 และ 9

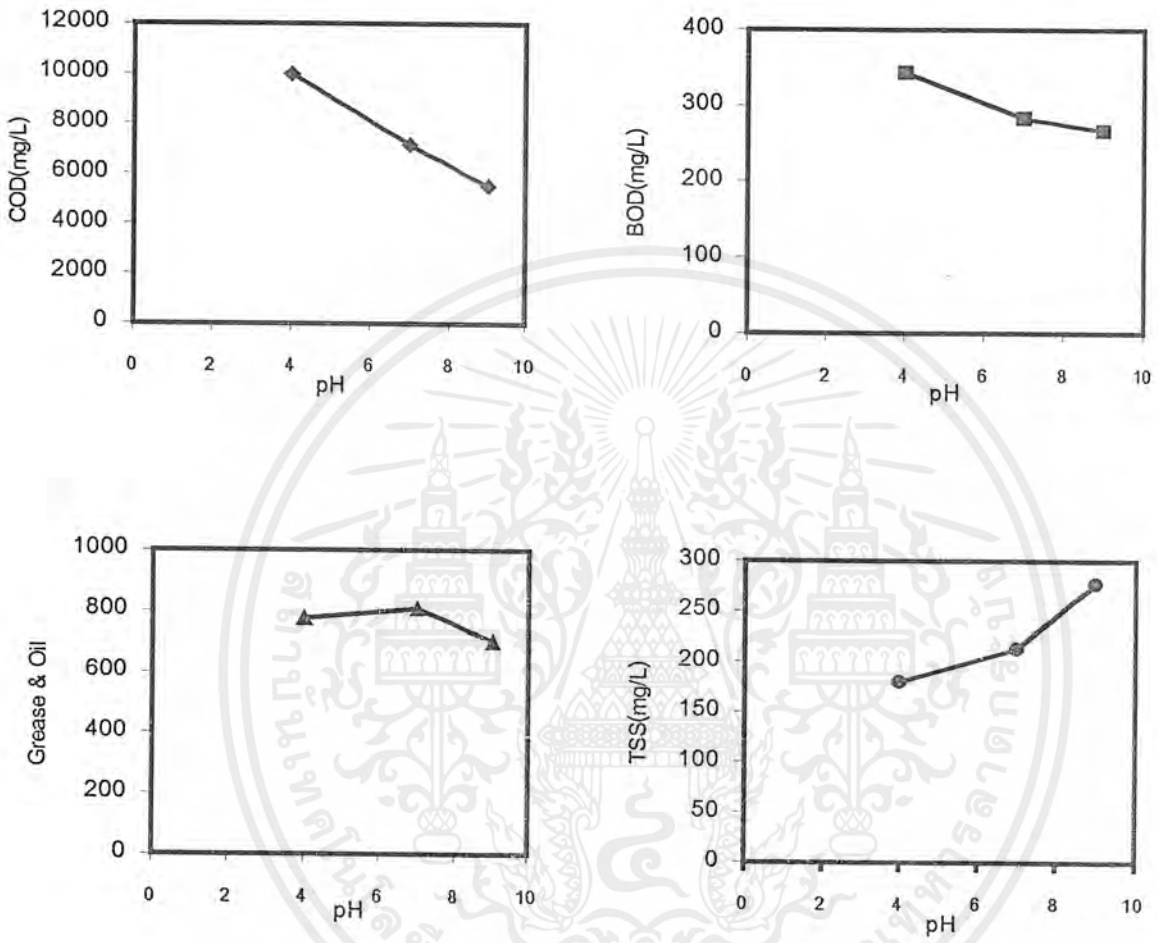
| ค่าเฉลี่ยแต่ละพารามิเตอร์        | ก่อนการบำบัด | หลังการบำบัดที่ |       |       |
|----------------------------------|--------------|-----------------|-------|-------|
|                                  |              | pH4             | pH7   | pH9   |
| COD (mg/L)                       | 11,603       | 9,980           | 7,149 | 5,497 |
| BOD (mg/L)                       | 900          | 343             | 283   | 266   |
| Grease & Oil (mg/L)              | 1,041        | 775             | 807   | 701   |
| TSS (mg/L)                       | 348          | 180             | 212   | 276   |
| ปริมาณO <sub>3</sub> ที่ใช้ (mg) | -            | 0.463           | 0.464 | 0.463 |

4.3.1 ผลของพีเอชต่อการบำบัดค่าซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน และ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

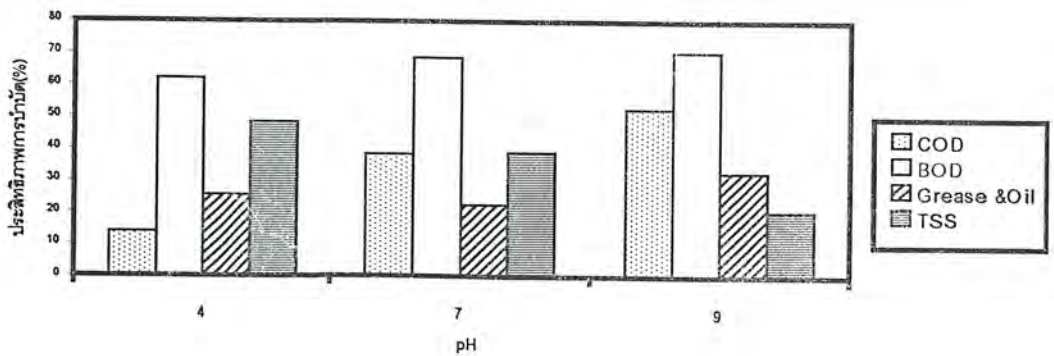
จากรูปที่ 4.3 กราฟซีไอดี เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นค่าซีไอดีมีแนวโน้มลดลง โดยที่พีเอช 9 มีค่าซีไอดีต่ำที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่พีเอช 4 7 และ 9 แสดงดังรูปที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 13.99 38.38 และ 52.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่พีเอช 9 มีค่าสูงสุด อธิบายได้ว่า การบำบัดด้วยโอโซนในสภาวะที่เป็นเบสจะส่งเสริมการสลายตัวของโอโซนให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล(Singer, 1991) ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียสูง มีผลทำให้ค่าซีไอดีที่พีเอช 9 มีค่าน้อยกว่าค่าซีไอดีที่พีเอช 4 และ 7

ในกรณีของผลของพีเอชต่อการบำบัดบีไอดีแสดงดังรูปที่ 4.3 ค่าบีไอดีมีแนวโน้มลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอช 4 7 และ 9 แสดงดังรูปที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 61.85 68.52 และ 70.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าที่พีเอช 9 มีประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดีสูงสุด เหตุผลอธิบายได้ในทำนองเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่เวลา 1.5 ชั่วโมง พีเอช 4 7 และ 9



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพีเอช 4 7 และ 9



ผลของพีเอชต่อการบำบัดปริมาณไขมันและน้ำมันแสดงดัง รูปที่ 4.3 ที่พีเอช 9 ปริมาณไขมันและน้ำมันมีค่าน้อยที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัดไขมันและน้ำมันที่พีเอช 4 7 และ 9 แสดงดังรูปที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 25.57 22.43 และ 32.63 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่พีเอช 4 และ 9 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันและไขมันมีค่าสูงกว่าที่พีเอช 7 เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วยสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน ในการบำบัดสารอินทรีย์พวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เสถียร เช่น PAHs จะถูกออกซิไดซ์ได้ดีที่พีเอช 2.5 ซึ่งสารประกอบอะโรมาติกจะเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับไฮดรอกซิล (Kommuller, 1997) ดังนั้นที่พีเอช 4 อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลได้ดี ทำให้ปริมาณไขมันและน้ำมันมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้ามที่พีเอช 9 สารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ดี เนื่องจากที่สภาวะเป็นเบสจะส่งเสริมให้เกิดการสลายตัวของไฮดรอกซิลไปเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไขมันและน้ำมันมีค่าสูง

จากรูปที่ 4.3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่พีเอช 4 7 และ 9 แสดงดัง รูปที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 48.28 38.88 และ 20.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อธิบายได้ว่า โลหะที่มีอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นและที่ปนเปื้อนมาจากการเสียดสีของเครื่องจักรในสภาวะเป็นเบส โลหะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้ค่าการละลายน้อยลง และเกิดการตกตะกอน ทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่พีเอช 9 มีค่าสูง

ดังนั้นที่พีเอช 9 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดเนื่องจากสามารถลดปริมาณซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมัน และน้ำมันได้ดี

#### 4.3.2 ปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการบำบัดที่พีเอช 4 7 และ 9 เวลาการบำบัด 1.5 ชั่วโมง

จาก ตารางที่ 4.3 ปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการบำบัดที่พีเอช 4 7 และ 9 มีค่าเท่ากับ 0.463 0.464 และ 0.463 มิลลิกรัม ตามลำดับ จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ t-test (ตาราง ง-1 ในภาคผนวก ง) พบว่าปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการบำบัดที่พีเอชต่างๆมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### 4.3.3 ผลของเวลาต่อการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9

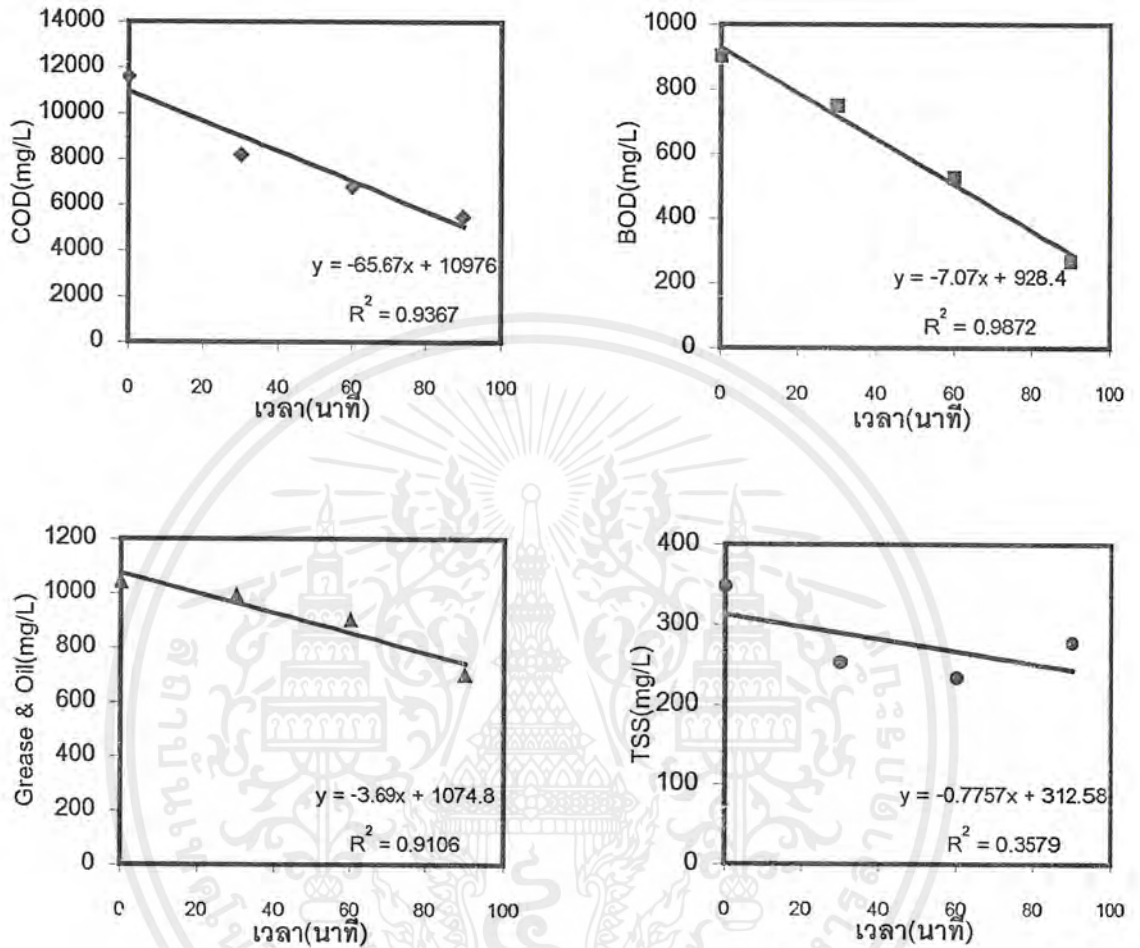
เพื่อศึกษาผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9 มีการแปรค่าเวลาเป็น 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัดที่เวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 และนำผลการวิเคราะห์ซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ มาพล็อตกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9 เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง

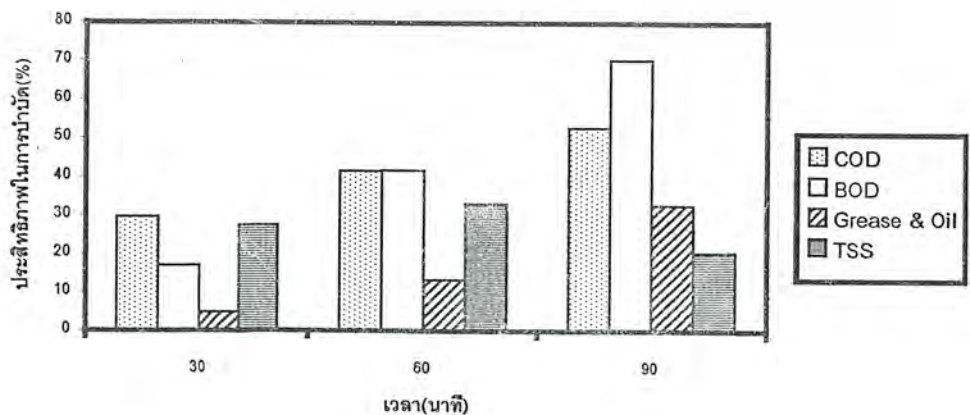
| ค่าเฉลี่ยแต่ละพารามิเตอร์        | เวลา (ชั่วโมง) |       |       |       |
|----------------------------------|----------------|-------|-------|-------|
|                                  | 0.0            | 0.5   | 1.0   | 1.5   |
| COD(mg/L)                        | 11,603         | 8,184 | 6,801 | 5,497 |
| BOD(mg/L)                        | 900            | 748   | 526   | 267   |
| Grease & Oil(mg/L)               | 1,041          | 991   | 903   | 702   |
| TSS(mg/L)                        | 348            | 253   | 233   | 277   |
| ปริมาณO <sub>3</sub> ที่ใช้ (mg) | -              | 0.134 | 0.285 | 0.467 |

จากรูปที่ 4.5 พบว่าหลังการบำบัด ค่าซีไอดี บีไอดี และ ปริมาณไขมันและน้ำมัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาที่ใช้บำบัดเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง เท่ากับ 29.48 41.39 และ 52.62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดีที่เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง เท่ากับ 16.86 41.52 และ 70.37 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไขมันและน้ำมันที่เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง เท่ากับ 4.86 13.28 32.63 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากรูปที่ 4.6 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมันมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าเมื่อเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้น ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัดเพิ่มขึ้น ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าซีไอดี บีไอดี และปริมาณไขมันและน้ำมันมีค่าลดลง

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9 เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9 เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง



**รูปที่ 4.4** จากแนวโน้มของกราฟปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด คาดว่าประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเมื่อใช้เวลาในการบำบัดมากกว่า 0.5 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างคงที่ กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง แสดงดัง **รูปที่ 4.5** มีค่าเท่ากับ 27.38 32.96 และ 20.49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หากต้องการบำบัดเพียงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดไม่ควรเพิ่มเวลามากกว่า 0.5 ชั่วโมง เนื่องจากไม่เกิดประโยชน์ใดๆ และเป็นภาระสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

จาก**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าซีไอดี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9367 สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ คือ  $y = -65.67x + 10976$

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าบีไอดี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9872 สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ คือ  $y = -7.07x + 928.4$

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าปริมาณไขมันและน้ำมัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9160 สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ คือ  $y = -3.69x + 1074.8$

ความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.3579 สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ คือ  $y = -0.7757x + 312.58$

การบำบัดซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน ที่เวลาต่าง ๆ แสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงและมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 ดังนั้นสามารถหาอัตราการบำบัด (เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง) ได้ ยกเว้นอัตราการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดไม่สามารถคำนวณหาได้ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ต่ำ ค่าอัตราการบำบัดของแต่ละพารามิเตอร์ แสดงดัง**ตารางที่ 4.5**

**ตารางที่ 4.5** อัตราการบำบัด (เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง) ด้วยไอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9

| พารามิเตอร์  | อัตราการบำบัดเฉลี่ย (%.hr <sup>-1</sup> ) |
|--------------|---|
| COD          | 39.41                                     |
| BOD          | 43.98                                     |
| Grease & Oil | 18.02                                     |
| TSS          | -   |

ดังนั้น การบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัด เนื่องจากสามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน และปริมาณของแข็งแขวนลอย ทั้งหมด และเวลาที่ดีที่สุดในการบำบัดคือ ที่เวลา 1.5 ชั่วโมง

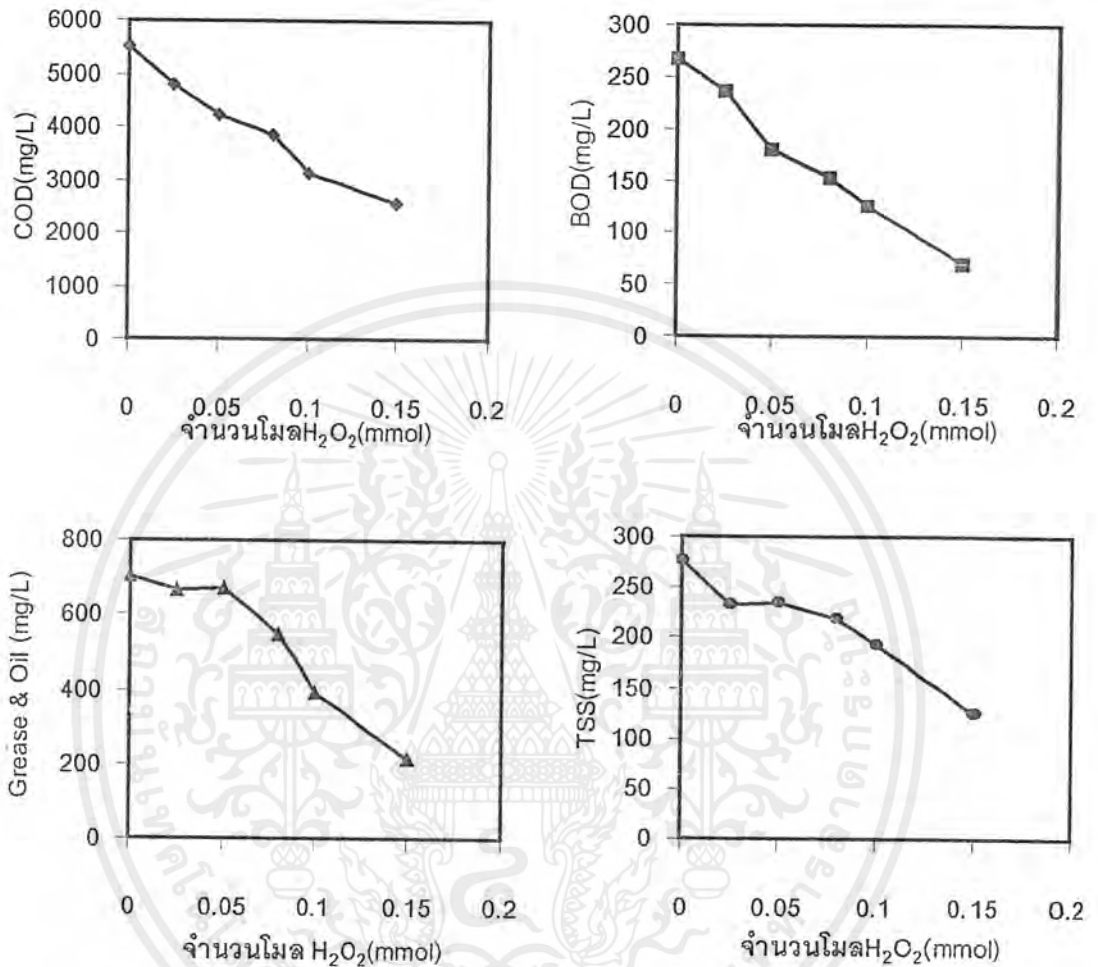
#### 4.4 ผลการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ในขั้นตอนนี้เป็นกรบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง โดยทำการแปรค่าจำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 0.000 0.025 0.050 0.080 0.100 และ 0.150 มิลลิโมล ผลการวิเคราะห์ซีโอดี บีโอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.6 และนำผลการวิเคราะห์ทุกพารามิเตอร์ มาพล็อตกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง

| ค่าเฉลี่ยแต่ละพารามิเตอร์ | จำนวนโมล $H_2O_2$ (mmol) |       |       |       |       |       |
|---------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 0.000                    | 0.025 | 0.050 | 0.080 | 0.100 | 0.150 |
| COD(mg/L)                 | 5,497                    | 4,793 | 4,244 | 3,843 | 3,116 | 2,574 |
| BOD(mg/L)                 | 266                      | 236   | 180   | 153   | 126   | 70    |
| Grease & Oil(mg/L)        | 701                      | 667   | 671   | 545   | 394   | 216   |
| TSS(mg/L)                 | 276                      | 233   | 235   | 218   | 193   | 126   |
| ปริมาณ $O_3$ ที่ใช้ (mg)  | 0.463                    | 0.469 | 0.466 | 0.470 | 0.470 | 0.471 |

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการบำบัดด้วยไฮโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง



#### 4.4.1 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการบำบัดด้วยไฮโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากรูปที่ 4.7 พบว่าหลังการบำบัดโดยใช้ไฮโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน และ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อใช้จำนวนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น

การใช้โอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสภาวะที่เป็นเบส ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลไฮดรอกซีไอออน ( $\text{HO}_2^-$ ) สนับสนุนอัตราการสลายตัวของโอโซน และทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดเพิ่มมากขึ้น (Masten and Davies, 1994) ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์มากขึ้น จะเห็นได้จากการเปรียบเทียบค่าซีไอดี บีไอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน และ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ระหว่างการบำบัดโดยใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวกับการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว

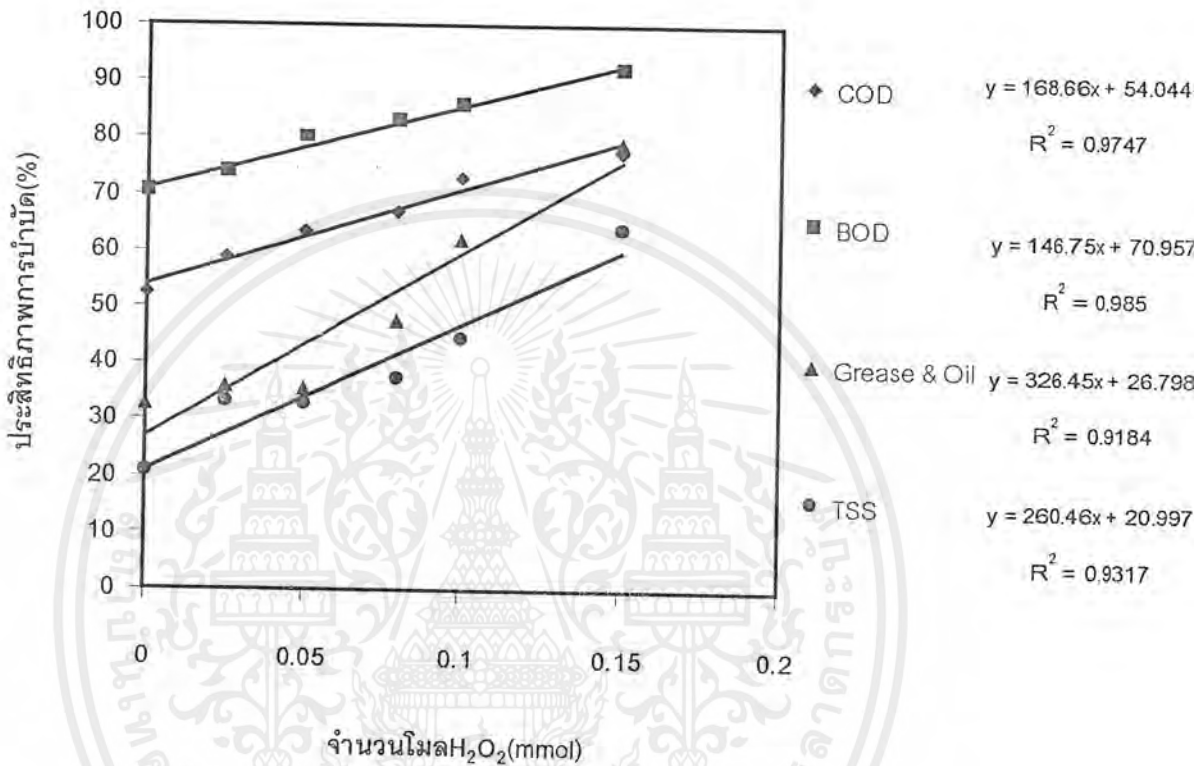
โดยประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดี เมื่อแปรค่าไมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.025 0.050 0.080 0.100 และ 0.150 มิลลิโมล มีค่าเท่ากับ 73.70 80.00 82.97 85.92 และ 92.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเมื่อแปรค่าไมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.025 0.050 0.080 0.100 และ 0.150 มิลลิโมล มีค่าเท่ากับ 58.69 63.42 66.88 73.14 และ 77.82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณน้ำมันและไขมัน เมื่อแปรค่าไมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.025 0.050 0.080 0.100 และ 0.150 มิลลิโมล มีค่าเท่ากับ 35.92 35.53 47.64 62.11 และ 79.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เมื่อแปรค่าไมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.025 0.050 0.080 0.100 และ 0.150 มิลลิโมล มีค่าเท่ากับ 32.96 32.47 37.36 44.45 และ 63.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง



จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ซีโอดี ปริมาณไขมันและน้ำมัน ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เมื่อแปรค่าจำนวนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 0.000 0.025 0.050 0.080 0.100 และ 0.150 มิลลิโมล สมการแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละพารามิเตอร์มีดังนี้

ประสิทธิภาพการบำบัด(%)บีโอดี  $y = 146.75x + 70.957$

ประสิทธิภาพการบำบัด(%)ซีโอดี  $y = 168.66x + 54.044$

ประสิทธิภาพการบำบัด(%)ปริมาณไขมันและน้ำมัน  $y = 326.45x + 26.798$

ประสิทธิภาพการบำบัด(%)ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด  $y = 260.46x + 20.997$

เมื่อ  $y =$  ประสิทธิภาพในการบำบัด(%)

$x =$  จำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและทำซ้ำอย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควบคู่กับโอโซน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี บีไอดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณไขมันและน้ำมัน และปริมาณของแข็งแขวนลอย ทั้งหมดได้ดีกว่าการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว

#### 4.4.2 ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อแปรค่าจำนวนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.000 0.025 0.050 0.080 0.100 และ 0.150 มิลลิโมล เท่ากับ 0.463 0.469 0.466 0.470 0.470 และ 0.471 มิลลิกรัมตามลำดับ จากการทดสอบสมมติฐาน t-test ( ตาราง ง-3 ในภาคผนวก ง ) พบว่าปริมาณโอโซนที่ใช้บำบัดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 90%



รูปที่ 4.9 ลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตไอโซนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เครื่องผลิตไอโซน สามารถผลิตไอโซนได้เท่ากับ 0.342 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ในการบำบัดด้วยไอโซนเพียงอย่างเดียว สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด คือ ที่พีเอช 9 เนื่องจากที่สภาวะเป็นเบสช่วยส่งเสริมการสลายตัวของไอโซนไปเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลทำให้สามารถบำบัดซีโอดี บีโอดี และ ปริมาณไขมันและ น้ำมันได้ดี ยกเว้นปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสามารถบำบัดได้ดีที่สุดที่พีเอช 4 เมื่อทำการแปรค่าระยะเวลาการบำบัดด้วยไอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9 เป็น 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี บีโอดี และปริมาณไขมันและน้ำมันมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ส่วนการบำบัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดไม่ควรเพิ่มเวลามากกว่า 0.5 ชั่วโมง เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อใช้เวลาในการบำบัดมากกว่า 0.5 ชั่วโมง ในการบำบัดด้วยไอโซนเพียงอย่างเดียวที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง อัตราการบำบัดบีโอดีมีค่าสูงสุดเท่ากับ 43.98 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง รองลงมาคือ อัตราการบำบัดซีโอดี และปริมาณไขมันและน้ำมัน มีค่าเท่ากับ 39.41 และ 18.02 ตามลำดับ ในการบำบัดด้วย ไอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยไอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดีกว่าการบำบัดด้วยไอโซนเพียงอย่างเดียว และ ประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อใช้ จำนวนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยส่งเสริมการสลายตัวของไอโซน และทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มมากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการค้นคว้าวิจัยในขั้นต่อไป

1. ควรศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสถานบริการน้ำมัน โดยมีการเก็บตัวอย่างจริงมาวิเคราะห์และบำบัด เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการสร้างระบบบำบัดจริง
2. ควรศึกษาการสร้างระบบบำบัดให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยการเพิ่มอัตราส่วนจากเดิม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดจริง
3. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไอโซนบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากแหล่งอื่น เช่น ภัตตาคาร และโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นต้น
4. ควรศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยประยุกต์ใช้  $O_3/UV$  หรือ  $O_3/H_2O_2/UV$  เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดให้ดียิ่งขึ้น
5. ควรศึกษาการนำน้ำทิ้งจากสถานบริการน้ำมันที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

## บรรณานุกรม

1. American Chemical Society Specifications. *Reagent Chemicals*, USA, 1993. ✓
2. American Petroleum Institute. *Manual on Disposal of Refinery Waste*. New York, USA, 1969.
3. American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. American Public Health Association Inc, Maryland, 1987.
4. American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. American Public Health Association Inc, Maryland, 1995.
5. Barnhart, E.L. *The Impact of Oily Material on Activated Sludge Systems*. Hydrosience, New Jersey, 1971.
6. Bentez, F.J.; Beltran de Heredia, J.; Acera, J.L.; Pinilla, M.L. *Industrial Engineering Chemistry Research*. 1997, 36, 638-644.
7. Chiang, P.C.; Tialao, H.; Ko, Y.W.; Chang, E.E. *Wat. Supp.* 1995, 13(3/4), 177-182.
8. Chumnum Siri wattana, S. *Wastewater Characteristic from Petrol Station*. Faculty of Public Health, Mahidol University, Bangkok, Thailand, 1995.
9. Colodette, S.L.; Singh, U.P.; Ghosh, A.K.; Singh, R.P. *Pulp and Paper*, June, 1993.
10. Cuno, M.; Weigert, B.; Behrendt, J.; Wiesmann, U. *Wat. Sci. Tech.* 1995, 35(4), 57-64.
11. Echegaray, D.F.; Olivieri, R.F. *Wat. Sci. Tech.* 1994, 29(8), 257-261.
12. Edwards, M.; Benjamin, M.M. *J. AWWA*. 1991, 96-105.
13. Farooq, S.; Misbahuddin, M. *Environ. Tech.* 1991, 12, 147-159.
14. Farvadin, M.R.; Collins, A.G. *Wat. Res.* 1989, 23(3), 307-316.
15. Gordus, A.A. *Analytical Chemistry*, USA, 1987.
16. Gulyas, H.; Bockelmann, D.; Hemmerling, L.; Bahnemann, D.; Sekoulov, I. *Wat. Sci. Tech.* 1994, 32(7), 127-134.
17. Gulyas, H.; Von Bismarck, R.; Hemmerling, L. *Wat. Sci. Tech.* 1995, 32(7), 127-134.
18. Haeseler, F.; Stieber, M.; Werner, P.; Frimmel, F.H. *Wat. Sci. Tech.* 1993, 35(4), 57-64.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. Hoslachy, J.C. et. Al. *Wat. Sci. Tech.* 1997, 35(2-3), 261-268.
20. Kornmuller, A.; Cumo, M.; Wiesmann, U. *Wat. Sci. Tech.* 1997, 35(4), 57-64.
21. Kornsitthekul, C. *Alternative Treatment of Retrol Station Wastewater.* Thesis, AIT, 1998.
22. Laclair, L.M.; Rosen, H.M. *Ozonation application : The use of High-Purity Oxygen in the Acted Sludge Process,* USA, 1978.
23. Labrega, M.K.; Buckingham, P.L.; Evans, J.J.C. *Hazardous Waste Management,* Mcgraw-Hill, Singapore, 1994.
24. Langlais, C.; Reckhow, D.A.; Crink, D.R. *Ozone in Water Treatment (Application and Engineering).* Lewis Publishers Inc, Michigan, USA, 1991.
25. Masten, S.J.; Davies, S.H.R. *Wat. Sci. Tech.* 1994,28(4), 180A-185A.
26. Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse.* New York, 1991.
27. Orlandini, E.; Siebel, M.A.; Craveland, A; Schippers, J.C. *Watt. Supp.* 1996, 14(2), 99-108.
28. Porthuluri, J.V.; Cerniglia, C.E. *Wat. Sci. Tech.* 1994, 35(4), 57-64.
29. Sales, C.L. *Investigation of Combined use of ozone and hydrogen peroxide (peroxone) as disinfectant in Bangkok Water Treatment Plant.* AIT Thesis No. EV-92-97, Asian Insitute of Technology, 1992.
30. San lab, Co,m Ktd, *Analysis report.* Bangkok, Thailand, 1994.
31. Singer, P.C. Assessing ozonation research needs in water treatment. *Ozone News,* 1991,19,2: 10-30.
32. Stockinger, H.; Heinzle, E.; Kutz, O.M. *Wat. Sci. Tech.* 1995, 29, 2016-2022.
33. Van Leeuwen, J. *Wat. SA.* 1989, 15(2), 127-132.
34. กรมควบคุมมลพิษ. *มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากสถานีบริการน้ำมันในประเทศไทย* 1994.
35. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม. *สรุปข่าวพลังงาน.* 2541, 24(10), 5-6.

36. เขมรัฐ วงศ์ทิมารัตน์, ทนงฤทธิ์ จิโรจน์กุล, บวร อังคนาวาศัลย์, บัณฑิต บัณประไพ. *เครื่องผลิตไอโซนพลังงานแสงอาทิตย์*. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
37. ธงชัย พรรณสวัสดิ์, มีนา พิทยาโสภณกิจ, ปราณีย์ พันธุมเลิศสินชัย, อินจิรา นิยมธรร. *การประชุมวิชาการระดับชาติ สวสท'36 เทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ*. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, มิถุนายน, 1993.
38. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. *แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
39. พรทิพย์ ศัพทอนันต์. *ปฏิบัติการเคมีทั่วไป*, 2539.
40. มุกดา จิรภูมิพันธ์. *เคมีวิเคราะห์ปริมาณเล่ม 1*, 2536.
41. สมาคมพิษวิทยาแห่งประเทศไทยร่วมกับสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม. *พิษวิทยาทางอุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม*. การประชุมวิชาการประจำปี 2531, กรกฎาคม, 2531.
42. อุดม กักพล, ไสภณ เรืองสำราญ, อมร เพชรสม. *อินทรีย์เคมี 1*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

**ภาคผนวก ก**  
**คุณสมบัติน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน**

**ตาราง ก-1 รายงานการวิเคราะห์น้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมัน 48 แห่ง**

| ลำดับ | พารามิเตอร์ |       |      |       |       | ปริมาณน้ำที่ใช้<br>(ลบ.ม./เดือน) | ลำดับ | พารามิเตอร์ |      |     |      |       | ปริมาณน้ำที่ใช้<br>(ลบ.ม./เดือน) |
|-------|-------------|-------|------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------------|------|-----|------|-------|----------------------------------|
|       | PH          | BOD   | SS   | Oil   | Pb    |                                  |       | pH          | BOD  | SS  | Oil  | Pb    |                                  |
| 1     | 7.49        | 1410  | 2133 | 114.4 | 0.075 | 1000                             | 25    | 7.48        | 255  | 47  | 24.0 | 0.188 | 160                              |
| 2     | 7.18        | 90    | 18   | 22.6  | 0.183 | 1300                             | 26    | 6.84        | 95   | 219 | 14.0 | 0.327 | 600                              |
| 3     | 7.35        | 150   | 119  | 14.3  | 0.279 | -                                | 27    | 7.55        | 149  | 176 | 29.2 | 0.328 | 600                              |
| 4     | 6.96        | 39    | 65   | 21.3  | N.D.  | 600                              | 28    | 7.45        | 71   | 26  | 20.6 | 0.200 | 150                              |
| 5     | 7.65        | 69    | 20   | 18.6  | 0.204 | 600                              | 29    | 7.21        | 188  | 53  | 30.6 | 0.210 | 750                              |
| 6     | 6.94        | 893   | 499  | 69.2  | 0.025 | 1200                             | 30    | 7.20        | 133  | 73  | 36.2 | 0.143 | 450                              |
| 7     | 8.15        | 26250 | 6330 | 180.6 | 0.050 | 1000                             | 31    | 7.04        | 175  | 69  | 34.8 | 0.081 | 400                              |
| 8     | 7.1         | 203   | 88   | 48.2  | N.D.  | 800                              | 32    | 7.32        | 578  | 577 | 40.1 | 0.227 | 500                              |
| 9     | 7.52        | 156   | 197  | 41.9  | N.D.  | 600                              | 33    | 7.34        | 205  | 170 | 5.5  | 0.161 | 150                              |
| 10    | 8.92        | 152   | 38   | 22.4  | 0.039 | 500                              | 34    | 6.69        | 342  | 481 | 57.0 | 0.009 | 700                              |
| 11    | 7.04        | 56    | 24   | 20.4  | 0.030 | 600                              | 35    | 7.36        | 125  | 97  | 29.9 | 0.008 | 550                              |
| 12    | 7.55        | 224   | 471  | 40.4  | 0.039 | 900                              | 36    | 7.16        | 128  | 105 | 36.3 | 0.095 | 400                              |
| 13    | 6.94        | 80    | 8    | 2.2   | 0.300 | 1400                             | 37    | 7.53        | 1005 | 915 | 60.5 | 0.207 | 500                              |
| 14    | 7.64        | 93    | 34   | 18.6  | 0.031 | 1500                             | 38    | 7.91        | 199  | 70  | 24.5 | N.D.  | 400                              |
| 15    | 7.42        | 94    | 20   | 8.0   | 0.097 | 700                              | 39    | 7.10        | 176  | 88  | 32.4 | 0.095 | 800                              |
| 16    | 7.52        | 173   | 379  | 38.5  | 0.176 | 800                              | 40    | 7.69        | 220  | 463 | 47.1 | 0.224 | 700                              |
| 17    | 7.19        | 153   | 83   | 37.9  | 0.137 | 700                              | 41    | 7.05        | 127  | 77  | 24.0 | 0.155 | 450                              |
| 18    | 7.22        | 73    | 36   | 10.3  | 0.156 | 1400                             | 42    | 7.78        | 93   | 130 | 3.5  | 0.177 | 300                              |
| 19    | 7.87        | 35    | 16   | 9.5   | 0.218 | 1000                             | 43    | 7.83        | 71   | 24  | 12.2 | N.D.  | 180                              |
| 20    | 7.50        | 110   | 36   | 10.1  | 0.018 | 1000                             | 44    | 7.45        | 53   | 44  | 21.3 | 0.133 | 100                              |
| 21    | 7.39        | 425   | 190  | 41.2  | 0.230 | 600                              | 45    | 7.71        | 39   | 81  | 15.0 | N.D.  |                                  |
| 22    | 7.94        | 198   | 36   | 31.5  | 0.030 | 700                              | 46    | 7.59        | 1665 | 331 | 89.1 | 0.058 |                                  |
| 23    | 7.00        | 90    | 133  | 4.3   | 0.296 | 440                              | 47    | 6.88        | 115  | 83  | 0.4  | 0.146 | 180                              |
| 24    | 6.72        | 85    | 73   | 5.7   | N.D.  | 500                              | 48    | 6.79        | 125  | 162 | 6.5  | 0.018 | 100                              |

หมายเหตุ หน่วย : มก./ล. ยกเว้นค่า pH

แหล่งที่มา : Sanlob Co.,Ltd. (1994)

ตาราง ก-2 ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของทุกพารามิเตอร์ที่ได้จากสถานี  
บริการน้ำมัน 48 แห่ง

| พารามิเตอร์          | พีเอช | บีโอดี<br>(มก./ล.) | ของแข็ง<br>แขวนลอย<br>(มก./ล.) | ปริมาณน้ำมัน<br>(มก./ล.) | ปริมาณตะกั่ว<br>(มก./ล.) | ปริมาณน้ำที่ใช้<br>(ลบ.ม./เดือน) |
|----------------------|-------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| ค่าเฉลี่ย            | 7.38  | 784                | 325                            | 31.8                     | 0.141                    | 644                              |
| มัธยฐาน              | 7.38  | 141                | 83                             | 24.0                     | 0.146                    | 600                              |
| ค่าสูงสุด            | 8.92  | 26,250             | 6,330                          | 180.6                    | 0.328                    | 1,500                            |
| ค่าต่ำสุด            | 6.69  | 35                 | 8                              | 0.4                      | 0.008                    | 100                              |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.40  | 3,729              | 938                            | 31.8                     | 0.099                    | -                                |
| P <sub>20</sub>      | 7.05  | 100                | 45                             | 10.0                     | 0.010                    | -                                |
| P <sub>80</sub>      | 7.60  | 200                | 200                            | 40.0                     | 0.210                    | -                                |

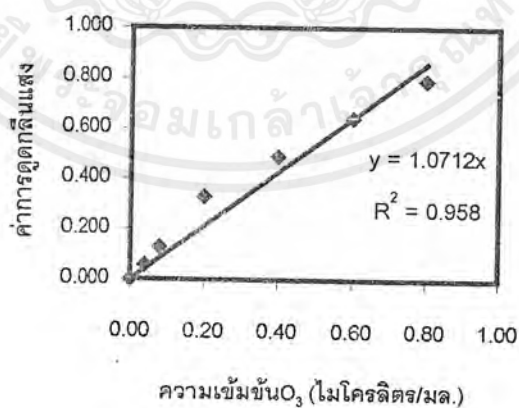
ที่มา : Kornsittnikul, 1998

ภาคผนวก ข  
การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน

ตาราง ข-1 ผลการทำกราฟมาตรฐาน

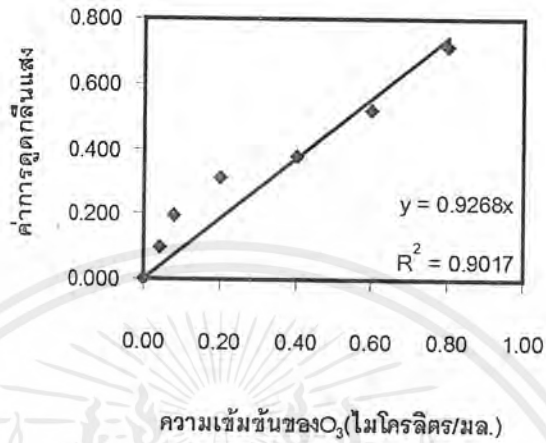
| ความเข้มข้น $O_3$ (ไมโครลิตร/ลิตร) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            |
|------------------------------------|------------------|------------|------------|
|                                    | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| 0.00                               | 0.000            | 0.000      | 0.000      |
| 0.04                               | 0.059            | 0.095      | 0.079      |
| 0.08                               | 0.130            | 0.194      | 0.127      |
| 0.20                               | 0.329            | 0.315      | 0.262      |
| 0.40                               | 0.491            | 0.377      | 0.352      |
| 0.60                               | 0.641            | 0.520      | 0.688      |
| 0.80                               | 0.793            | 0.718      | 0.734      |

รูป ข-1 กราฟมาตรฐาน(1)

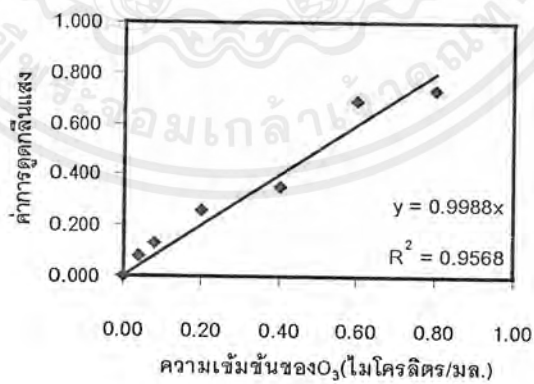


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ข-2 กราฟมาตรฐาน (2)



รูป ข-3 กราฟมาตรฐาน (3)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตโอโซน

| ครั้งที่ | เวลา<br>(นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |          |       | ปริมาณ $O_3$ (มล.) | ปริมาณ $O_3$ (มก.) |
|----------|----------------|------------------|----------|-------|--------------------|--------------------|
|          |                | ขวดที่ 1         | ขวดที่ 2 | รวม   |                    |                    |
| 1        | 20             | 0.202            | 0.005    | 0.207 | 0.058              | 0.110              |
| 1        | 30             | 0.269            | 0.006    | 0.275 | 0.077              | 0.150              |
| 1        | 45             | 0.375            | 0.007    | 0.382 | 0.107              | 0.240              |
| 1        | 80             | 0.702            | 0.038    | 0.740 | 0.207              | 0.410              |
| 2        | 20             | 0.198            | 0.003    | 0.201 | 0.065              | 0.128              |
| 2        | 30             | 0.283            | 0.007    | 0.290 | 0.094              | 0.184              |
| 2        | 45             | 0.350            | 0.010    | 0.360 | 0.116              | 0.228              |
| 2        | 80             | 0.780            | 0.045    | 0.825 | 0.267              | 0.524              |
| 3        | 20             | 0.214            | 0.004    | 0.218 | 0.065              | 0.128              |
| 3        | 30             | 0.273            | 0.006    | 0.279 | 0.084              | 0.164              |
| 3        | 45             | 0.381            | 0.012    | 0.393 | 0.118              | 0.232              |
| 3        | 80             | 0.740            | 0.040    | 0.780 | 0.234              | 0.460              |

หาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ในเวลา 20 นาที

จากกราฟมาตรฐาน(1)

$$y = 1.0717x$$

$$x = \frac{0.2070}{1.0717} = 0.1931 \mu\text{L/mL}$$

$$1.0717$$

สารละลาย KI ที่ใช้ในการดักโอโซนมีปริมาตร 300 มิลลิลิตร

$$\text{โอโซนที่ผลิตได้ในเวลา 20 นาที} = 0.1931 \mu\text{L/mL} \times 300\text{mL}$$

$$= 0.058 \text{ mL}$$

อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

ที่สภาวะมาตรฐานโอโซน 1 mol มีปริมาตร 24.47 ลิตร

ดังนั้นโอโซนที่ผลิตได้ในเวลา 20 นาที ที่สภาวะมาตรฐาน

$$= 0.058 \times 10^{-3} \text{ L} \times \frac{1 \text{ mol } O_3}{24.47 \text{ L}} \times \frac{48.00 \text{ g } O_3}{1 \text{ mol } O_3} = 0.11 \text{ mg}$$

$$24.47 \text{ L} \quad 1 \text{ mol } O_3$$

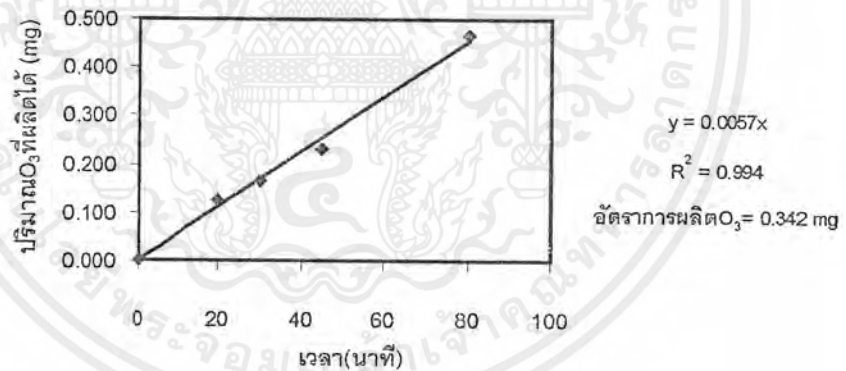
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกัน ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลา 30 45 และ 80 นาที  
คำนวณเช่นเดียวกับวิธีข้างต้น

ตารางที่ ข-3 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้

| เวลา(นาที) | ปริมาณ O <sub>3</sub> ที่ผลิตได้(mg) |            |            |        |
|------------|--------------------------------------|------------|------------|--------|
|            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 20         | 0.110                                | 0.128      | 0.128      | 0.122  |
| 30         | 0.150                                | 0.184      | 0.164      | 0.166  |
| 45         | 0.240                                | 0.228      | 0.232      | 0.233  |
| 80         | 0.410                                | 0.524      | 0.460      | 0.465  |

รูป ข-4 กราฟมาตรฐาน (4)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค**  
**ข้อมูลผลการวิจัย**

**ตาราง ค-1** คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

| ครั้งที่ | COD(mg/L) | BOD(mg/L) | Grease & Oil(mg/L) | TSS(mg/L) |
|----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|
| 1        | 10,168.0  | 980.0     | 1,044.0            | 368.0     |
| 2        | 10,147.0  | 920.0     | 1,151.0            | 336.0     |
| 3        | 14,496.0  | 800.0     | 929.0              | 340.0     |
| เฉลี่ย   | 11,603.0  | 900.0     | 1,041.0            | 348.0     |

**ตาราง ค-2** ข้อมูลผลการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว

| เวลา (ชั่วโมง) | pH | COD (mg/L) | BOD (mg/L) | Grease & Oil (mg/L) | TSS (mg/L) | ปริมาณO <sub>3</sub> ที่ผลิต (mg) | ปริมาณO <sub>3</sub> ที่เหลือ (mg) | ปริมาณO <sub>3</sub> ที่ใช้(mg) |
|----------------|----|------------|------------|---------------------|------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 0.5            | 9  | 8,948.8    | 737.5      | 1,107.0             | 276.0      | 0.171                             | 0.045                              | 0.126                           |
| 0.5            | 9  | 6,664.0    | 835.0      | 1,103.0             | 228.0      | 0.171                             | 0.029                              | 0.142                           |
| 0.5            | 9  | 8,937.6    | 672.5      | 832.0               | 254.0      | 0.171                             | 0.036                              | 0.135                           |
| เฉลี่ย         | 9  | 8,183.5    | 748.3      | 990.7               | 252.7      | 0.171                             | 0.037                              | 0.134                           |
| 1.0            | 9  | 6,873.4    | 565.0      | 1,019.0             | 220.0      | 0.342                             | 0.074                              | 0.268                           |
| 1.0            | 9  | 8,806.3    | 577.5      | 836.9               | 280.0      | 0.342                             | 0.048                              | 0.294                           |
| 1.0            | 9  | 4,721.9    | 437.0      | 853.0               | 200.0      | 0.342                             | 0.049                              | 0.293                           |
| เฉลี่ย         | 9  | 6,800.5    | 526.3      | 903.0               | 233.3      | 0.342                             | 0.057                              | 0.285                           |
| 1.5            | 9  | 4,647.5    | 270.0      | 737.0               | 246.0      | 0.513                             | 0.044                              | 0.469                           |
| 1.5            | 9  | 6,746.4    | 280.0      | 723.0               | 274.0      | 0.513                             | 0.046                              | 0.467                           |
| 1.5            | 9  | 5,097.3    | 250.0      | 644.0               | 310.0      | 0.513                             | 0.059                              | 0.454                           |
| เฉลี่ย         | 9  | 5,497.3    | 266.7      | 701.5               | 276.7      | 0.513                             | 0.050                              | 0.463                           |
| 1.5            | 4  | 9,408.0    | 310.0      | 928.0               | 180.0      | 0.513                             | 0.057                              | 0.456                           |
| 1.5            | 4  | 7,488.0    | 370.0      | 719.0               | 178.0      | 0.513                             | 0.042                              | 0.471                           |
| 1.5            | 4  | 13,046.4   | 350.0      | 678.0               | 182.0      | 0.513                             | 0.050                              | 0.463                           |
| เฉลี่ย         | 4  | 9,980.8    | 343.3      | 775.0               | 180.0      | 0.513                             | 0.050                              | 0.463                           |
| 1.5            | 7  | 7,149.6    | 270.0      | 959.0               | 210.0      | 0.513                             | 0.039                              | 0.474                           |
| 1.5            | 7  | 7,546.8    | 320.0      | 735.0               | 210.0      | 0.513                             | 0.052                              | 0.461                           |
| 1.5            | 7  | 6,752.4    | 260.0      | 729.0               | 218.0      | 0.513                             | 0.055                              | 0.458                           |
| เฉลี่ย         | 7  | 7,149.6    | 283.3      | 807.7               | 212.7      | 0.513                             | 0.049                              | 0.464                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-3 ข้อมูลผลการบำบัดน้ำเสียด้วยไอโซนควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

| จำนวนโมล<br>H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mmol) | pH | COD<br>(mg/L) | BOD<br>(mg/L) | Grease & Oil<br>(mg/L) | TSS<br>(mg/L) | ปริมาณO <sub>3</sub> ที่ผลิต<br>(mg) | ปริมาณO <sub>3</sub> ที่เหลือ<br>(mg) | ปริมาณO <sub>3</sub> ที่ใช้<br>(mg) |
|--|----|---------------|---------------|------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 0.025  | 9  | 3,268.0       | 230.0         | 526.0                  | 206.0         | 0.513                                | 0.054                                 | 0.459                               |
| 0.025  | 9  | 5,882.4       | 220.0         | 668.0                  | 228.0         | 0.513                                | 0.042                                 | 0.471                               |
| 0.025  | 9  | 5,228.8       | 260.0         | 808.0                  | 266.0         | 0.513                                | 0.046                                 | 0.467                               |
| เฉลี่ย   | 9  | 4,793.1       | 236.7         | 667.3                  | 233.3         | 0.513                                | 0.047                                 | 0.466                               |
| 0.050  | 9  | 5,319.6       | 240.0         | 744.0                  | 252.0         | 0.513                                | 0.047                                 | 0.466                               |
| 0.050  | 9  | 4,352.4       | 180.0         | 733.0                  | 245.0         | 0.513                                | 0.045                                 | 0.468                               |
| 0.050  | 9  | 3,062.8       | 120.0         | 497.0                  | 208.0         | 0.513                                | 0.050                                 | 0.463                               |
| เฉลี่ย   | 9  | 4,244.9       | 180.0         | 671.3                  | 235.0         | 0.513                                | 0.047                                 | 0.466                               |
| 0.080  | 9  | 4,362.4       | 120.0         | 539.5                  | 210.0         | 0.513                                | 0.049                                 | 0.464                               |
| 0.080  | 9  | 4,362.4       | 160.0         | 574.5                  | 238.0         | 0.513                                | 0.048                                 | 0.465                               |
| 0.080  | 9  | 2,804.4       | 180.0         | 521.4                  | 206.0         | 0.513                                | 0.050                                 | 0.463                               |
| เฉลี่ย   | 9  | 3,843.1       | 153.3         | 545.2                  | 218.0         | 0.513                                | 0.049                                 | 0.464                               |
| 0.100  | 9  | 2,901.6       | 120.0         | 392.0                  | 192.0         | 0.513                                | 0.045                                 | 0.468                               |
| 0.100  | 9  | 2,901.6       | 120.0         | 317.5                  | 218.0         | 0.513                                | 0.051                                 | 0.462                               |
| 0.100  | 9  | 3,546.4       | 140.0         | 474.0                  | 170.0         | 0.513                                | 0.048                                 | 0.465                               |
| เฉลี่ย   | 9  | 3,116.5       | 126.7         | 394.5                  | 193.3         | 0.513                                | 0.048                                 | 0.465                               |
| 0.150  | 9  | 2,178.0       | 60.0          | 272.0                  | 134.0         | 0.513                                | 0.047                                 | 0.466                               |
| 0.150  | 9  | 2,970.0       | 60.0          | 227.9                  | 120.0         | 0.513                                | 0.046                                 | 0.467                               |
| 0.150  | 9  | 2,574.0       | 90.0          | 150.8                  | 124.0         | 0.513                                | 0.052                                 | 0.461                               |
| เฉลี่ย   | 9  | 2,574.0       | 70.0          | 216.9                  | 126.0         | 0.513                                | 0.048                                 | 0.465                               |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ง**  
**การทดสอบข้อมูลทางสถิติ**

**ตาราง ง-1 การทดสอบสมมติฐานการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว  
ที่เวลา 1.5 ชั่วโมง พีเอช 4 7 และ 9**

| พารามิเตอร์  | คู่เปรียบเทียบ | ระดับความเชื่อมั่น (%) | df. | t       | ขอบเขตวิกฤต | ผลการทดสอบสมมติฐาน |
|--------------|----------------|------------------------|-----|---------|-------------|--------------------|
| COD          | pH 4 กับ pH 7  | 95                     | 2   | -0.471  | 0.684       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 4 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 2.150   | 0.165       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 7 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 3.364   | 0.078       | แตกต่างกัน         |
| BOD          | pH 4 กับ pH 7  | 95                     | 2   | 2.384   | 0.140       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 4 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 8.693   | 0.013       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 7 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 1.387   | 0.300       | แตกต่างกัน         |
| Grease & Oil | pH 4 กับ pH 7  | 95                     | 2   | -3.222  | 0.840       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 4 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 1.228   | 0.344       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 7 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 1.720   | 0.228       | แตกต่างกัน         |
| TSS          | pH 4 กับ pH 7  | 95                     | 2   | -18.520 | 0.003       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 4 กับ pH 9  | 95                     | 2   | -5.400  | 0.033       | แตกต่างกัน         |
|              | pH 7 กับ pH 9  | 95                     | 2   | -3.959  | 0.058       | แตกต่างกัน         |
| 0            | pH 4 กับ pH 7  | 95                     | 2   | -0.116  | 0.918       | ไม่แตกต่างกัน      |
|              | pH 4 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 0.000   | 1.000       | ไม่แตกต่างกัน      |
|              | pH 7 กับ pH 9  | 95                     | 2   | 0.199   | 0.861       | ไม่แตกต่างกัน      |

หมายเหตุ -สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ t-test

-ใช้โปรแกรม SPSS 7.5 ในการคำนวณทางสถิติ

ตาราง ง-2 การทดสอบสมมติฐานการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว  
ที่พีเอช 9 เวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง

| พารามิเตอร์                 | คู่เปรียบเทียบ      | ระดับความเชื่อมั่น (%) | df. | t       | ขอบเขตวิกฤต | ผลการทดสอบสมมติฐาน |
|-----------------------------|---------------------|------------------------|-----|---------|-------------|--------------------|
| COD                         | 0.5 กับ 1.0 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 0.74    | 0.536       | แตกต่าง            |
|                             | 0.5 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 1.932   | 0.193       | แตกต่าง            |
|                             | 1.0 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 1.55    | 0.261       | แตกต่าง            |
| BOD                         | 0.5 กับ 1.0 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 8.709   | 0.013       | แตกต่าง            |
|                             | 0.5 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 12.382  | 0.066       | แตกต่าง            |
|                             | 1.0 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 7.134   | 0.019       | แตกต่าง            |
| Grease & Oil                | 0.5 กับ 1.0 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 1.327   | 0.312       | แตกต่าง            |
|                             | 0.5 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 5.016   | 0.038       | แตกต่าง            |
|                             | 1.0 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 4.124   | 0.054       | แตกต่าง            |
| TSS                         | 0.5 กับ 1.0 ชั่วโมง | 95                     | 2   | 0.542   | 0.642       | ไม่แตกต่าง         |
|                             | 0.5 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | -0.884  | 0.470       | แตกต่าง            |
|                             | 1.0 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | -1.253  | 0.337       | แตกต่าง            |
| ปริมาณO <sub>3</sub> ที่ใช้ | 0.5 กับ 1.0 ชั่วโมง | 95                     | 2   | -32.286 | 0.001       | แตกต่าง            |
|                             | 0.5 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | -45.624 | 0.000       | แตกต่าง            |
|                             | 1.0 กับ 1.5 ชั่วโมง | 95                     | 2   | -15.048 | 0.004       | แตกต่าง            |

หมายเหตุ -สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ t-test

-ใช้โปรแกรม SPSS 7.5 ในการคำนวณทางสถิติ

ตาราง ง-3 การทดสอบสมมติฐานการบำบัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์  
ที่พีเอช 9 เวลา 1.5 ชั่วโมง

|                              |  |    |   |        |       |               |
|------------------------------|--|----|---|--------|-------|---------------|
| COD                          | 0 กับ 0.025 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 95 | 2 | 1.588  | 0.253 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.05 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 1.294  | 0.325 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.08 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 2.415  | 0.137 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.1 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>   | 95 | 2 | 3.242  | 0.083 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.15 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 6.846  | 0.021 | แตกต่างกัน    |
| BOD                          | 0 กับ 0.025 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 95 | 2 | 1.441  | 0.286 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.05 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 2.925  | 0.100 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.08 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 6.107  | 0.026 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.1 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>   | 95 | 2 | 9.165  | 0.012 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.15 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 10.597 | 0.009 | แตกต่างกัน    |
| Grease & Oil                 | 0 กับ 0.025 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 95 | 2 | 0.341  | 0.783 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.05 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 0.506  | 0.663 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.08 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 7.133  | 0.019 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.1 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>   | 95 | 2 | 4.340  | 0.049 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.15 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 49.236 | 0.000 | แตกต่างกัน    |
| TSS                          | 0 กับ 0.025 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 95 | 2 | 24.568 | 0.002 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.05 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 1.310  | 0.321 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.08 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 2.588  | 0.122 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.1 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>   | 95 | 2 | 2.941  | 0.099 | แตกต่างกัน    |
|                              | 0 กับ 0.15 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 95 | 2 | 7.032  | 0.020 | แตกต่างกัน    |
| ปริมาณ O <sub>3</sub> ที่ใช้ | 0 กับ 0.025 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 90 | 2 | 0.349  | 0.761 | ไม่แตกต่างกัน |
|                              | 0 กับ 0.05 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 90 | 2 | 0.576  | 0.661 | ไม่แตกต่างกัน |
|                              | 0 กับ 0.08 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 90 | 2 | 0.157  | 0.890 | ไม่แตกต่างกัน |
|                              | 0 กับ 0.1 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>   | 90 | 2 | 0.347  | 0.762 | ไม่แตกต่างกัน |
|                              | 0 กับ 0.15 mmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 90 | 2 | 0.450  | 0.697 | ไม่แตกต่างกัน |

หมายเหตุ -สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ t-test

-ใช้โปรแกรม SPSS 7.5 ในการคำนวณทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้