

ชนิดของถึงปฏิกรณ์แบบกะที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายแอมโมเนีย



นางสาวนพมาศ เจริญดี  
นางสาวพิศศุภางค์ มีศิลป์



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61421  
วัน,เดือน,ปี..... 17 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

Effect of batch reactor type on the removal of an aqueous  
ammonia solution by ozonation



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง ชนิดของถึงปฏิกรณ์แบบกะที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายแอมโมเนีย  
โดย นางสาวนพมาศ เจริญดี  
นางสาวพิศศุภางค์ มีศิลป์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุธาสิทธิ์ เนรมิตตกพงศ์

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง ชนิดของถังปฏิกรณ์แบบกะที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายแอมโมเนีย  
โดย นางสาวนพมาศ เจริญดี  
นางสาวพิศศุภางค์ มีศิลป์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุภาสินี เนรมิตตกพงศ์  
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในน้ำด้วยวิธีไอโซเนชั่น โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างถังปฏิกรณ์แบบถังกวน และหอกระจายฟอง ในการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 55 และ 47 ตามลำดับ ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัดอาจเกิดจาก ในถังกวนมีการกวนที่ดีกว่า ทำให้มีการกระจายความเข้มข้นที่ดี และเกิดความดันลดน้อยกว่าทำให้มีปริมาณไอโซนเข้ามาบำบัดแอมโมเนียได้มากกว่าหอกระจายฟอง และจากการทดลอง พบว่ามีอันดับของปฏิกริยาในถังกวน เท่ากับ 0.06

Report Title    Effect of batch reactor type on the removal of an aqueous ammonia solution by ozonation

By                Miss Noppamas Charoendee  
                     Miss Phitsuphang Meesin

Advisor        Dr. Sutasinee Neramittagapong

Report for     Bachelor Degree of Chemical Engineering  
                     Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering  
                     King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## ABSTRACT

The aim of this work is to compare the efficiency of ammonia removal using stirred tank reactor and bubble column. Ozonation was carried out in batch reactor for 2 hours to treat aqueous ammonia solution with an initial concentration of 0.5 molar. It was found that 55% and 42% of ammonia was removed by using stirred tank and bubble column, respectively. Better mixing and smaller pressure drop in stirred tank may cause higher ammonia conversion. Moreover, an order of the reaction in stirred tank was 0.06.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากเงินรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และใคร่ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ได้แก่ ดร.สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท และ ดร.อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ ผู้ให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย นายวัชรภรณ์ ปราณิ ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการทำงานวิจัยนี้

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวนพมาศ เจริญดี

นางสาวพิศศกาญจน์ มีศิลป์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
รายการสัญลักษณ์.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 เนื้อหาโครงการ.....	4
2.1.1 แอมโมเนีย.....	4
2.1.2 ก๊าซไอโซน.....	5
2.1.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ.....	6
2.1.4 ค่าสัดส่วนการละลาย.....	9
2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
3.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของก๊าซไอโซน สำหรับถังกวนและหอกระจายฟอง.....	13
3.2 ทดลองการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนียในถังกวนและ หอกระจายฟอง.....	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการศึกษาต่อ.....	22
เอกสารอ้างอิง.....	23
ภาคผนวก.....	24
ภาคผนวก ก.....	25
ภาคผนวก ข.....	29
ภาคผนวก ค.....	35
ภาคผนวก ง.....	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัดส่วนการละลายของก๊าซไอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	10
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดแอมโมเนีย ในถังปฏิกรณ์แบบกะ 2 ชนิด.....	21
ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียกับค่าการดูดกลืนแสง (ช่วงความเข้มข้นต่ำ).....	27
ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียกับค่าการดูดกลืนแสง (ช่วงความเข้มข้นสูง).....	28
ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนออกซิเจน เข้าเครื่องผลิตไอโซนกับปริมาณไอโซนในถังปฏิกรณ์แบบกะ.....	29
ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนออกซิเจน เข้าเครื่องผลิตไอโซนกับปริมาณไอโซนในถังปฏิกรณ์แบบฟอง อากาศที่ใส่แผ่นกระจายฟอง เวลา 5 นาที.....	29
ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนออกซิเจน เข้าเครื่องผลิตไอโซนกับปริมาณไอโซนในถังปฏิกรณ์แบบฟอง อากาศที่ไม่ใส่แผ่นกระจายฟองเวลา 5 นาที.....	30
ตารางที่ ข.4 อัตราเร็วของก๊าซไอโซนที่ออกจากเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซนที่อัตรา การป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่อง 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที.....	
ตารางที่ ข.5 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำโดยวิธี ไอโซนชั้นที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลาต่างๆในถังกวน.....	30
ตารางที่ ข.6 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น แอมโมเนียเริ่มต้นต่ำโดยวิธีไอโซนชั้นในถังกวน.....	31
ตารางที่ ข.7 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงโดยวิธี ไอโซนชั้นที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลาต่างๆในถังกวน.....	31
ตารางที่ ข.8 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น แอมโมเนียเริ่มต้นสูงโดยวิธีไอโซนชั้นในถังกวน.....	32

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข.9 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำโดยวิธี ไอโซเนนซ์ที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที่ ที่เวลาต่างๆในหอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่ข้างท่อ.....	32
ตารางที่ ข.10 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นต่ำโดยวิธีไอโซเนนซ์ใน หอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่ข้างท่อ.....	33
ตารางที่ ข.11 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำโดย วิธีไอโซเนนซ์ที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที่ ที่เวลาต่างๆในหอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่กลางท่อ.....	33
ตารางที่ ข.12 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น แอมโมเนียเริ่มต้นต่ำโดยวิธีไอโซเนนซ์ในหอกระจายฟอง โดยเก็บตัวอย่างที่กลางท่อ.....	33
ตารางที่ ข.13 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงโดยวิธี ไอโซเนนซ์ที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที่ ที่เวลาต่างๆในหอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่กลางท่อ.....	34
ตารางที่ ข.14 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น แอมโมเนียเริ่มต้นสูงโดยวิธีไอโซเนนซ์ในหอกระจายฟอง โดยเก็บตัวอย่างที่กลางท่อ.....	34

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.1 การจัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในถังกวน.....	12
รูปที่ 3.2 การจัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในหอกระจายฟอง.....	13
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของ ก๊าซไอโซนที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนต่างๆ.....	16
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการทำปฏิกิริยา ในการหาความสัมพันธ์ของอันดับปฏิกิริยา.....	17
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและ ร้อยละของการบำบัดแอมโมเนียในถังกวน.....	18
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและ ร้อยละของการบำบัดแอมโมเนียในหอกระจายฟอง.....	18
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละ ของการบำบัดแอมโมเนียในถังกวนและหอกระจายฟองก๊าซ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นต่างกัน.....	19
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราในการทำปฏิกิริยากับความ เข้มข้นแอมโมเนียและอัตราการทำปฏิกิริยาในถังกวนและ หอกระจายฟองก๊าซที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นสูง.....	20
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายแอมโมเนีย(ช่วงความเข้มข้นต่ำ).....	27
รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของแอมโมเนีย(ช่วงความเข้มข้นสูง).....	28
รูปที่ ง.1 ถังกวนปริมาตร 1000 มิลลิลิตร.....	36
รูปที่ ง.2 หอกระจายฟอง.....	36
รูปที่ ง.3 ตัวกระจายฟองและแผ่นกระจายฟอง.....	36
รูปที่ ง.5 ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองในหอกระจายฟอง.....	37
รูปที่ ง.4 ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองในถังกวน.....	37

## รายการสัญลักษณ์

- $C_A$  = ความเข้มข้นของสาร A (โมลต่อลิตร)  
 $C_B$  = ความเข้มข้นของสาร B (โมลต่อลิตร)  
 $K$  = ค่าคงที่สมดุล  
 $k_A$  = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา  
 $K_s$  = ค่าคงที่ของการละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อบรรยากาศ)  
 $P_{O_2}$  = ความดันย่อยของก๊าซไอโซน  
 $r_A$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A (โมลต่อลิตรต่อนาที)  
 $s$  = ค่าสัดส่วนการละลาย  
 $T$  = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)  
 $\alpha, \beta$  = อันดับของปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ศึกษา

การกำจัดแอมโมเนียในแหล่งน้ำเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากแอมโมเนียซึ่งเป็นสารประกอบไนโตรเจนในกรณีที่มีมากเกินไปจะก่อให้เกิดแหล่งน้ำเน่าเสียเนื่องจากขาดออกซิเจนกล่าวคือ ในน้ำที่มีสารประกอบของไนโตรเจนสูง พืชน้ำสามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีปริมาณมาก ในขณะที่พืชน้ำเจริญเติบโตต้องใช้ออกซิเจนจำนวนมากในการหายใจทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง สัตว์น้ำจึงตายเนื่องจากขาดออกซิเจน ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มขึ้น จึงเกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย นอกจากนี้ซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมกันทำให้เกิดปัญหาน้ำกืดเงินอีกด้วยอีกทั้งแอมโมเนียยังทำให้เกิดยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) หรือปรากฏการณ์ที่มีแพลงตอนเจริญเติบโตมากเกินไปในน้ำมีผลทำให้เกิดน้ำเขียวเข้มข้นและน้ำเหม็นในที่สุด [1] ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงจำเป็นที่จะศึกษาถึงการกำจัดแอมโมเนีย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการนำโอโซนมาใช้ในกระบวนการบำบัดแอมโมเนียในน้ำ จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมานิยมศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบกะ [2] ซึ่งพบปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (contact time) ระหว่างโอโซนกับแอมโมเนีย จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงศึกษาหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการนำโอโซนมาใช้บำบัดแอมโมเนีย โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์แบบกะชนิดถังคววนและชนิดหอกระจายฟอง เนื่องจากถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีลักษณะในการทำงานที่แตกต่างกัน คือในถังคววนจะทำให้มีการผสมสารในถังได้ดีส่วนในหอกระจายฟองจะช่วยเพิ่มปริมาณฟองก๊าซโอโซนซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลได้ดี ส่วนการใช้ก๊าซโอโซนในการบำบัดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดและไม่ก่อให้เกิดสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำภายหลังการบำบัด โดยจุดมุ่งหมายของงานวิจัยคือศึกษากระบวนการบำบัดแอมโมเนียในน้ำด้วยวิธีโอโซนชั้นในหอกระจายฟองเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในน้ำด้วยวิธีไอโซเนชันและความสามารถการละลายของก๊าซไอโซนในน้ำโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดถังกวนและแบบหอกระจายฟองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียด้วยไอโซน

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน ณ 600 800 1,000 1,200 และ 1,400 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโซน ที่มีผลต่อค่าการละลายของก๊าซไอโซนในน้ำ

1.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในน้ำในถังกวนและหอกระจายฟองที่มีต่อการบำบัดแอมโมเนียในน้ำ

## 1.4 ขั้นตอนโครงการ

### 1.4.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ในช่วงการศึกษาข้อมูลนี้ได้เริ่มศึกษาบทความทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไอโซนในการบำบัดแอมโมเนียในน้ำ พบว่าโดยส่วนใหญ่ทำในถังปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งพบปัญหาว่าไอโซนมีขีดจำกัดในการละลายจึงศึกษาข้อมูลของเครื่องปฏิกรณ์ ที่ใช้ในการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว พบว่าหอกระจายฟองสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาคซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล จึงทำการเปรียบเทียบหอกระจายฟองและถังกวนในการบำบัดแอมโมเนียในน้ำโดยใช้ไอโซนว่าให้ผลจริงตามทฤษฎีหรือไม่

### 1.4.2 ออกแบบแนวทางในการศึกษา

ในขั้นออกแบบแนวทางในการศึกษานี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.4.2.1 การทำการทดลองหาปริมาณไอโซนที่ละลายในน้ำ ที่อัตราการป้อนของออกซิเจนต่างๆ เข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโซนของถังกวนและในหอกระจายฟองและเลือกอัตราการป้อนที่เหมาะสม

1.4.2.2 ทำการทดลองปฏิบัติการออกซิเดชันแอมโมเนีย ที่อัตราการป้อนออกซิเจนเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโซนที่เหมาะสมจากการกระทำในข้อ 1.4.2.1 ในถังกวนและในหอกระจายฟอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียโดยใช้ไอโซนในถังกวนและในหอกระจายฟองรวมทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่นๆ ได้

1.5.2 จากข้อมูลเบื้องต้นสามารถนำไปเป็นพื้นฐานประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องบำบัดน้ำเสีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 เนื้อหาโครงการงาน

#### 2.1.1 แอมโมเนีย

ก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) มีคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

- เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว ไม่ติดไฟ
- น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 17
- มีความหนาแน่นไ 0.6 เท่าเมื่อเทียบกับอากาศ
- สามารถละลายน้ำได้ 89.9 กรัมต่อน้ำ 25 องศาเซลเซียสคือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- มีจุดเดือด  $-33.35$  องศาเซลเซียส
- มีจุดเยือกแข็ง  $-77.8$  องศาเซลเซียส

แอมโมเนียจัดเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่พบมากในน้ำชนิดหนึ่ง ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ ( $\text{NH}_3$ ) หรืออออนแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย โดยมีสมดุลเคมีดังนี้



โดยมี  $K = 10^{-9.3}$  ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่ง  $K$  คือ ค่าคงที่สมดุล

นั่นคือ

$$\frac{[\text{NH}_3][\text{H}^+]}{[\text{NH}_4^+]} = 10^{-9.3} \quad (3)$$

โดย เรียก  $\text{NH}_3$  ว่า ก๊าซแอมโมเนียหรือแอมโมเนียอิสระ (Free ammonia) ส่วน  $\text{NH}_4^+$  เรียกว่า อออนแอมโมเนีย ซึ่งโดยปกติแล้วเมื่อน้ำมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง แอมโมเนียจะอยู่ในรูปอออน  $\text{NH}_4^+$  มากกว่า  $\text{NH}_3$  เพื่อรักษาสมดุลแต่หากค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าสูงขึ้น จะมีการพบก๊าซแอมโมเนียมากขึ้นและพบแอมโมเนียในรูปอออนน้อยลง ซึ่งแอมโมเนียที่วิเคราะห์ได้จากห้องปฏิบัติการทางเคมีจะเป็นแอมโมเนียอิสระ [1]

แอมโมเนียจัดเป็นสารพิษชนิดหนึ่ง ซึ่งหากมีแอมโมเนียละลายอยู่ในน้ำปริมาณมากจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และสัตว์น้ำ แต่รูปที่เป็นพิษของแอมโมเนียนั้นคือแอมโมเนียอิสระหรือ  $\text{NH}_3$  ส่วน  $\text{NH}_4^+$  หรืออิออนแอมโมเนียมไม่มีพิษ ซึ่งในถังบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศหรือบ่อเลี้ยงปลาอาจมีแอมโมเนียได้มากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์และสัตว์น้ำ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำในบ่อนั้นมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง ซึ่งทราบได้ที่น้ำในบ่อมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.2 หรือมีค่าที่ต่ำกว่า แอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอิออนแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) ดังนั้นจึงไม่มีค่าความเป็นพิษถึงแม้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียจะสูงมากถึง 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าหากน้ำในบ่อนั้นมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ค่าความเป็นพิษของแอมโมเนียจะปรากฏ ซึ่งหากค่าความเป็นกรด-ด่างยิ่งมีสูงขึ้นค่าความเป็นพิษของแอมโมเนียก็จะปรากฏมากยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าแอมโมเนียจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากการหมักของตะกอนอินทรีย์ แต่ก็ยังสามารถเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ รวมถึงหากมีแอมโมเนียในน้ำแอมโมเนียจะไปลดปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำนั้น

### 2.1.2 ก๊าซโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซที่ได้จากการแตกตัวของออกซิเจน โดยใช้พลังงานสลายพันธะระหว่างออกซิเจน-ออกซิเจน ( $\text{O}=\text{O}$ ) ทำให้แตกออกอยู่ในรูปของออกซิเจนอะตอมเดี่ยว และรวมตัวกันใหม่เกิดเป็นก๊าซโอโซน ( $\text{O}_3$ ) โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรมีแนวโน้มที่จะสลายตัวกลับเป็นออกซิเจนได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน หรือภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารละลายไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) สารอินทรีย์ โลหะอัลคาไลด์ คาร์บอน ฯลฯ จึงไม่สามารถเก็บไว้นานๆ ได้ โดยส่วนใหญ่การนำก๊าซโอโซนมาใช้จะผลิต ณ สภาวะที่ใช้งาน

คุณสมบัติของโอโซนเป็นดังนี้

- มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48
- มีจุดเดือด -112 องศาเซลเซียส
- จุดหลอมเหลว -192 องศาเซลเซียส
- ไม่มีสีแต่มีกลิ่นฉุน
- มีค่า Oxidation Potential 2.07 โวลต์
- สามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิปกติ ความสามารถในการละลายน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ คือ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร
- สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอื่นได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซนเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีกับสารประกอบทางเคมีหลายชนิด สามารถละลายน้ำได้ดี ซึ่งสามารถคำนวณค่าการละลายของไอโซนโดยใช้กฎของเฮนรี (Henry's law) ดังสมการ

$$[O_3] = K_s P_{O_3} \quad (4)$$

โดยที่

$[O_3]$  = ความเข้มข้นของไอโซน (มิลลิกรัมต่อลิตร).

$K_s$  = ค่าคงที่ของการละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อบรรยากาศ)

$P_{O_3}$  = ความดันย่อยของไอโซน (บรรยากาศ)

จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ก๊าซไอโซนนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่ม และน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการสังเคราะห์สารต่างๆ ทั้งในอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการ [3]

### 2.1.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ

#### เครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column)

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้การถ่ายโอนมวลสาร ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาของวัฏภาคก๊าซเมื่อสัมผัสกับวัฏภาคของเหลว โดยลักษณะทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศเป็นท่อทรงกระบอกและมีตัวกระจายฟองที่ส่วนล่างของคอลัมน์ ส่วนของเหลวอาจบรรจุไว้ภายในคอลัมน์เป็นระบบนิ่งหรือให้ของเหลวมีทิศทางการไหลก็ขึ้นอยู่กับการออกแบบการทดลอง ซึ่งรูปแบบและชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ต่างชนิดกันก็มีผลต่อการละลายของก๊าซและการกระจายตัวของวัฏภาคก๊าซ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เนื่องจากมีผลต่อเนื่องกับความสามารถในการลอยตัวของก๊าซ และพื้นที่บริเวณสัมผัสซึ่งมีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารของ 2 วัฏภาคและเกี่ยวกับความสามารถในการทำปฏิกิริยากับของเหลว ซึ่งมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาและความสามารถในการถ่ายโอนมวลสาร โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วกว่าอัตราการถ่ายโอนมวลสารมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณารูปแบบของการกระจายตัวของก๊าซ ปกติการกระจายตัวของก๊าซจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกระจายฟองก๊าซ โดยวัสดุที่จะนำมาใช้ในการกระจายฟองจะต้องพิจารณาว่าวัสดุนั้นต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่เราต้องการวิเคราะห์

## - ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

ข้อมูลที่ใช้เป็นพื้นฐานในการพิจารณาและเลือกชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ อยู่ภายใต้เงื่อนไขของพื้นฐานที่ว่ารูปแบบของเครื่องมือที่สร้างมานั้นต้องสามารถปรับใช้ในการผลิตที่สภาวะต่างๆได้ เช่น อัตราการไหล ความดัน อุณหภูมิ และต้องคำนึงถึงวัสดุในการนำมาใช้ทำปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องนั้นต้องมีการรวบรวมข้อมูลเอาไว้ในเบื้องต้นแล้วว่า จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอื่นๆหรือไม่ เช่น ความดันขณะทำการทดลองและค่าการละลายของ ก๊าซและอุณหภูมิ อีกทั้งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic parameters) เช่น พื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว (interfacial area) ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของก๊าซ (dispersion coefficients) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและความร้อนของระบบ 2 ภูมิภาค (heat and mass transfer coefficients) และขนาดของฟองก๊าซ

## - การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีการนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบที่ต้องการให้มีการสัมผัสกันในหลายภูมิภาค เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลและความร้อน อีกทั้งช่วยเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมี และไม่ต้องทำการซ่อมบำรุงบ่อย เพราะไม่มีอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหวขณะทำงานมากนัก ทำให้ยังมีต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินการต่ำ จึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น นำมาใช้ด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน อัลคิลเลชัน พอลิเมอไรเซชัน ไฮโดรจีเนชัน และในกระบวนการที่มีการสังเคราะห์ต่างๆ และใช้ในอุตสาหกรรมด้านชีวภาพเช่นกระบวนการหมักและบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น [4]

## เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะมีลักษณะเป็นภาชนะหรือถังโดยจะบรรจุสารที่ต้องการวิเคราะห์ลงในถังและมีการปั่นกวนสารภายในถัง ซึ่งกลไกการทำงานคล้ายกับเครื่องซักผ้า

เครื่องนี้นิยมนำมาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาได้ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเข้มข้น ปริมาณไอโซนที่ใช้ไป เป็นต้น โดยข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ คือ เป็นวิธีที่ทำได้เร็วและง่าย ให้ปริมาณสารละลายในการทำปฏิกิริยาน้อยในการทำแบบจำลองศึกษาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อเวลา แต่วิธีการนี้ต้องทำการควบคุมค่าความเข้มข้นของไอโซนในถังปฏิกรณ์ให้คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลอดการทดลอง เช่นเดียวกันกับค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งปกติแล้วทั้ง 2 ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งเกิดขึ้นในการบำบัด

ข้อเสียของถังปฏิกรณ์แบบกะคือ เมื่อต้องการวิเคราะห์สารตัวใหม่จะต้องนำสารที่บรรจุอยู่เดิมนั้นออกก่อนและต้องทำความสะอาดก่อนเพื่อกำจัดสารที่อาจรบกวนการทำปฏิกิริยาใหม่ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ต้องใช้เวลาและต้นทุนเพิ่มขึ้นสำหรับการทำปฏิกิริยาในแต่ละถัง

โดยในระบบบำบัดน้ำเสียนั้น อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้สำหรับระบบที่มีการใช้ไอโซนต้องมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง เนื่องจากไอโซนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดี ดังนั้นจึงควรเลือกวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับไอโซน เช่น พีวีซี สแตนเลสสตีลหรือแก้ว เป็นต้น [3,5]

#### - วิเคราะห์ข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยวิธีอนุพันธ์ (Differential Method)

เมื่อปฏิกิริยาเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ในการหาอันดับของปฏิกิริยา ( $\alpha$ ) และค่าคงที่อัตรา ( $k$ ) วิธีนี้จะหาค่าได้เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงตัวเดียว เช่นจากปฏิกิริยา



จากนั้นจะสามารถใช้วิธีอนุพันธ์ในการหาได้

อย่างไรก็ตามสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $-r_A$  และความเข้มข้น โดยมีความเข้มข้นสารตั้งต้นหลายชนิดได้ โดยใช้วิธีมากเกินไป (Method of excess) เช่น ปฏิกิริยา



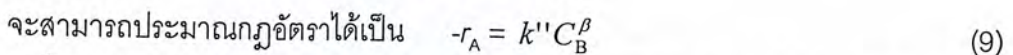
โดยที่  $\alpha$  และ  $\beta$  เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

สำหรับปฏิกิริยาที่มี B มากเกินไป ค่าความเข้มข้นของ B ( $C_B$ ) จะไม่เปลี่ยนแปลง



ซึ่ง  $k' = kC_B^\beta \approx kC_{B0}^\beta$  (8)

หลังจากหาค่า  $\alpha$  แล้ว จากนั้นทำให้มี A มากเกินไป



ดังนั้นจะสามารถหาค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  ได้ โดยค่า  $k_A$  สามารถคำนวณจากการวัดค่า  $-r_A$  ที่ความเข้มข้นของ A และ B

ทั้ง  $\alpha$  และ  $\beta$  สามารถหาโดยใช้วิธีมากเกินไป ควบคู่กับวิธีอนุพันธ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีอนุพันธ์จะพิจารณาที่ภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal) ในถึงปฏิกรณ์แบบกะ ที่มี ปริมาตรคงที่ และความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันกับเวลา โดยรวมสมดุลโมล (mole balance) กับ กฎอัตรา (rate law) โดยมีวิธีดังนี้

จากสมดุลโมล 
$$\frac{dN_A}{dt} = r_A V \quad (10)$$

ถ้า V เป็นค่าคงที่

$$\frac{dN_A}{dt} \times \frac{1}{V} = r_A$$

จากกฎอัตรา 
$$\frac{dC_A}{dt} = r_A$$

$$-r_A = kC_A^\alpha \quad (5)$$

จะได้เป็น 
$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^\alpha$$

จะได้เป็น 
$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^\alpha \quad (11)$$

ใส่ลอการิทึมธรรมชาติทั้ง 2 ข้าง จาก (11) จะได้

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln C_A \quad (12)$$

จาก (12) นำไปเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็น  $\ln C_A$  และแกนตั้งเป็น  $\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)$  จะได้ความชันของกราฟเป็นอันดับของปฏิกิริยา [6]

#### 2.1.4 ค่าสัดส่วนการละลาย (Solubility ratio)

ค่าสัดส่วนการละลายเป็นสัดส่วนที่สมดุลระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไอโซนในของเหลว ที่สมดุลกับความเข้มข้นของไอโซนในวัฏภาคของก๊าซ

ความสามารถในการละลายของก๊าซไอโซน สามารถเพิ่มขึ้นได้โดย

- เพิ่มความเข้มข้นของไอโซนในสภาวะก๊าซ
- เพิ่มความดัน
- ลดอุณหภูมิของน้ำ
- ลดจำนวนตัวถูกละลาย
- ลดค่าความเป็นกรด-ด่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าสัดส่วนการละลายขึ้นกับค่าอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\log s = -0.25 - 0.013 T \tag{13}$$

โดย

s คือ ค่าสัดส่วนการละลาย

T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้จากสมการนั้นอาจไม่ตรงกับค่าที่วิเคราะห์ได้ เนื่องจากก๊าซไอโซนสามารถละลายตัวไปเป็นก๊าซออกซิเจนได้เองโดยไม่ละลายกับสารละลาย โดยตารางที่ 1 แสดงค่าสัดส่วนการละลายของก๊าซไอโซนที่ความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัดส่วนการละลายของก๊าซไอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ [3]

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าสัดส่วนการละลาย
0	0.64
5	0.50
10	0.39
15	0.31
20	0.24
25	0.19
30	0.15
35	0.12

## 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กฤษฎา สัตยวิจิตรและคณะ [1] ศึกษาการบำบัดแอมโมเนียด้วยวิธีไอโซนชั้นเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อการออกแบบเครื่องบำบัด โดยคณะผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการบำบัด คือ อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน รูปทรงเครื่องปฏิกรณ์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง สำหรับที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยจากผลการวิจัยคณะผู้ทำการวิจัยสรุปว่าที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซไอโซนและรูปทรงของเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นแบบกะทรงกลมและแบบกะทรงสูงไม่มีผลต่อการบำบัดแอมโมเนียในน้ำ เนื่องจากพบว่าก๊าซไอโซนมีความสามารถในการละลายได้ใกล้เคียงกันในเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบ และมีเวลาในการทำปฏิกิริยากับสารละลายใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พงศ์นรินทร์ มนต์บุญเลี้ยงและคณะ [7] ศึกษาการกำจัดกำมะถันในถังปฏิกรณ์แบบ ฟองอากาศ และปรับปรุงอุปกรณ์ป้อนอากาศให้สามารถถ่ายเทก๊าซได้ดีขึ้น โดยศึกษาลักษณะของ ตัวกระจายก๊าซที่มีที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการลอยตัวของฟองอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลของก๊าซพบว่าอุปกรณ์ป้อนอากาศชนิดแผ่นเจาะรู ที่มีขนาดรูเท่ากัน(1 มิลลิเมตร) แต่มีรูปแบบการจัดเรียงรูกระจายฟองที่ต่างกัน มีผลทำให้เกิดความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลของก๊าซ คือ รูแบบวงแหวน มีผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงกว่า เมื่อจัดเรียงรู แบบกระจายตัวแบบสุ่ม

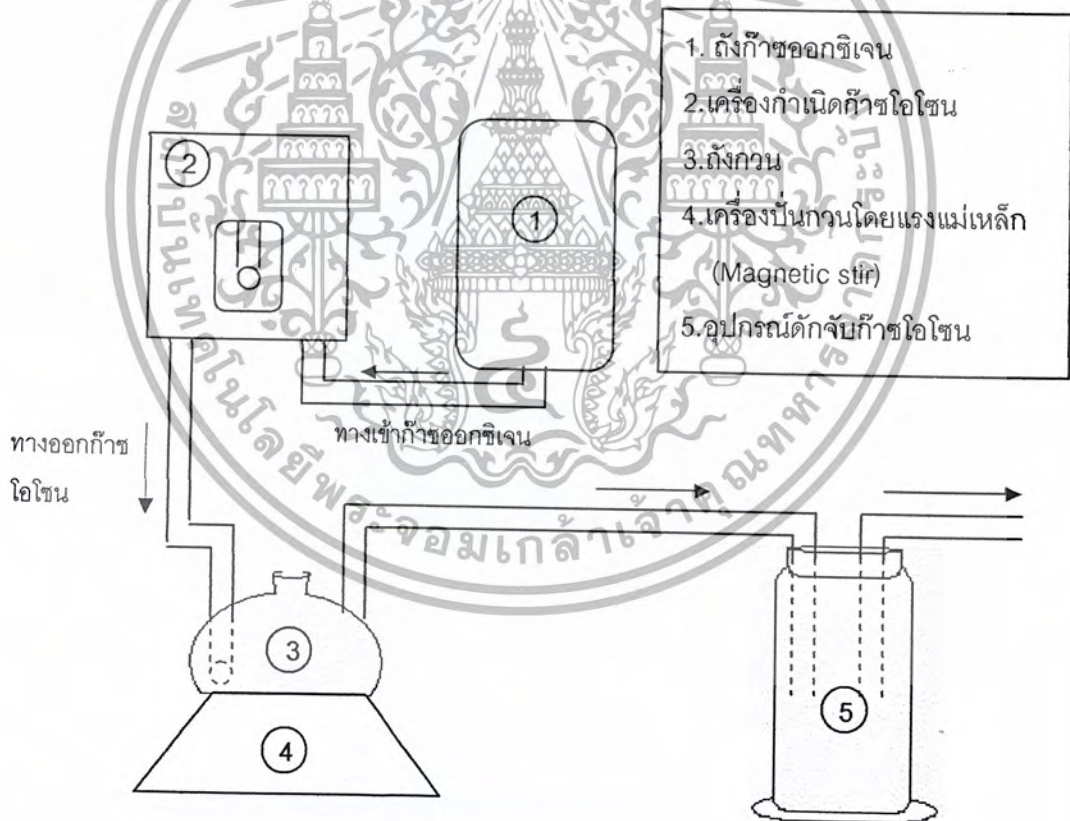
Konsowa [8] ศึกษาการนำบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยการใช้โอโซนบำบัด ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นสี ปริมาณโอโซน อัตราไหล่ก๊าซ โอโซน และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ซึ่งรายงานว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของสีจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นก๊าซโอโซน และอัตราการทำปฏิกิริยาจะแปรผกผันกับความ เข้มข้นสี อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีจะแปรผันตรงกับอัตราการป้อนก๊าซโอโซนและ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซโอโซนจนถึงค่าค่าหนึ่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุดและจากนั้นหาก เพิ่มอัตราการป้อนโอโซนอีกอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ สีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

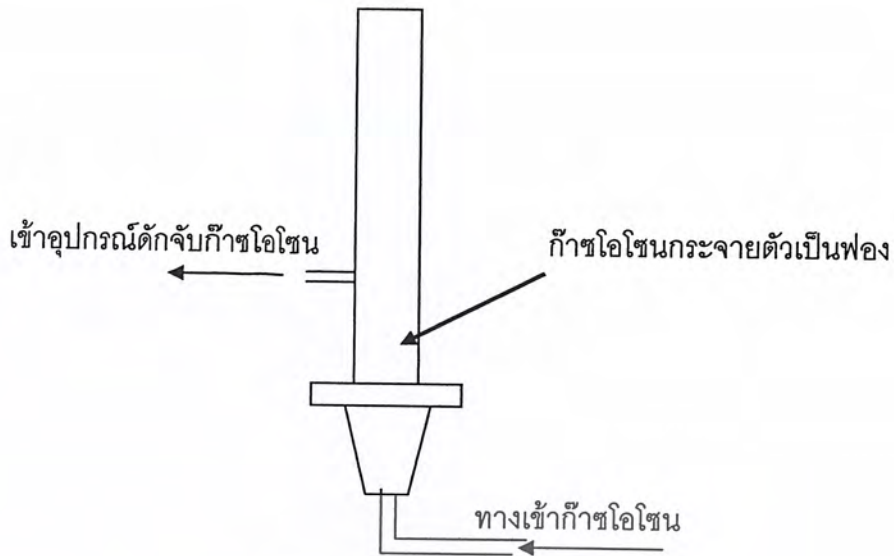
#### ขั้นตอนการทดลอง

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 3.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของก๊าซไอโซนที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซไอโซน ที่อัตราการป้อนก๊าซ 600 800 1,000 1,200 และ 1,400 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับถังกวนและแบบหอกระจายฟอง
- 3.2 ทดลองการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนียในถังกวนและหอกระจายฟองที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.1 การจัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในถังกวน



รูปที่ 3.2 การจัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในหอกระจายฟอง

ตอนที่ 3.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของก๊าซไอโซนที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซไอโซน ที่อัตราการป้อนก๊าซ 600 800 1,000 1,200 และ 1,400 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับถังกวนและหอกระจายฟอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก
2. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

เตรียมชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

1. นำสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 500 มิลลิลิตรใส่ลงในถังกวน และอีก 500 มิลลิลิตรใส่ลงในอุปกรณ์ดักจับก๊าซไอโซน
2. ป้อนก๊าซไอโซนที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 600 มิลลิลิตรต่อนาทีผ่านสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสารละลายสีเหลืองใส

3. นำสารละลายที่ได้มา 50 มิลลิลิตร ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) เข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งสีเหลืองหายไป
4. บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ที่ใช้ไปเพื่อไปคำนวณหาปริมาณไอโชน
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 4 โดยเปลี่ยนอัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าเครื่องผลิตไอโชนเป็น 800 1,000 1,200 และ 1,400 มิลลิลิตรต่อนาที
6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 5 โดยทำในหอกระจายฟองก๊าซ

**ตอนที่ 3.2** ทดลองการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนียในถังกวนและในหอกระจายฟองที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที

การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแอมโมเนียเพื่อให้ความเข้มข้นแอมโมเนียในน้ำมีค่าลดลง จากการทดลองในตอนต้นที่ 3.1 พบว่าที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซไอโชนที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ค่าปริมาณไอโชนที่ละลายในน้ำใกล้เคียงกันในถังกวนและในหอกระจายฟอง จึงเลือกศึกษาที่ค่านี้ เพราะอัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนที่สูงขึ้นก็ได้ปริมาณไอโชนใกล้เคียงกัน อีกทั้งการเลือกใช้ที่อัตราการป้อน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาทีถือเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายแอมโมเนีย (Panreac Quimica SA)
  2. สารละลายไดโซเดียมเอทิลีนไดเอมีนเตตราอะซิติกแอซิด (EDTA)
  3. สารเนสเลอร์
- (รายละเอียดวิธีการเตรียมสารดังกล่าวตามภาคผนวก ก)

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (JENWAY รุ่น 6405 UV/Vis Spectrophotometer)
2. เครื่องกำเนิดไอโชน (OZZON model : OZ-732)
3. ถังกวนแบบกะ
4. หอกระจายฟองแบบกะ
5. ถังปฏิกรณ์ดักจับก๊าซไอโชน
6. ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

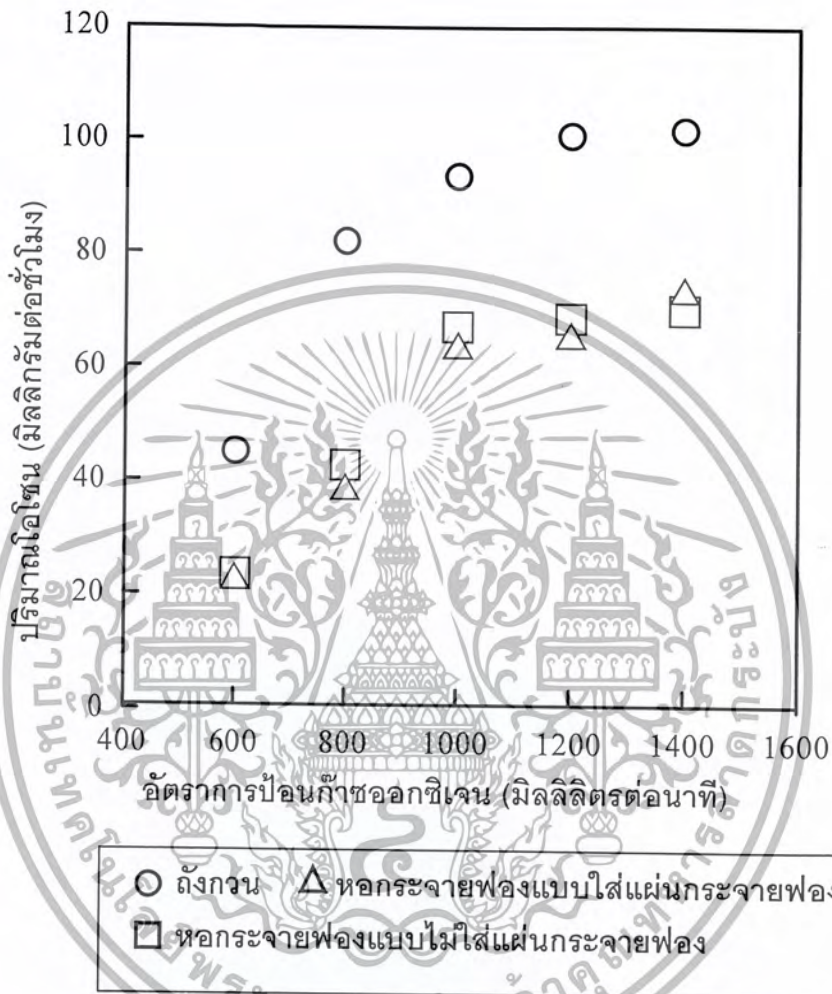
## วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายแอมโมเนีย
2. นำสารละลายแอมโมเนีย ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เติมลงในถังกวน
3. เก็บตัวอย่างเริ่มต้นปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตร เติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร หยดสารละลายอีดีทีเอ 1 หยด แล้วเติมสารเนสเลอร์ 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 15 นาทีเพื่อทำปฏิกิริยา จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง
4. ปรับอัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาทีเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซไอโซน
5. เปิดเครื่องผลิตก๊าซไอโซน พร้อมทั้งจับเวลา
6. เก็บตัวอย่างสารละลายแอมโมเนียทุกๆ 20 นาทีโดยทำตามวิธีในข้อ 2
7. ทำการทดลองซ้ำในหอคกระจายฟองโดยทำเช่นเดียวกันตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 4 และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้



## บทที่ 4

## ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของก๊าซไอโซนที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซไอโซน ณ อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตไอโซน ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศด้วยอัตราการป้อน 600 800 1,000 1,200 และ 1,400 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกะ แบบฟองก๊าซที่มีและไม่มีแผ่นกระจายฟอง

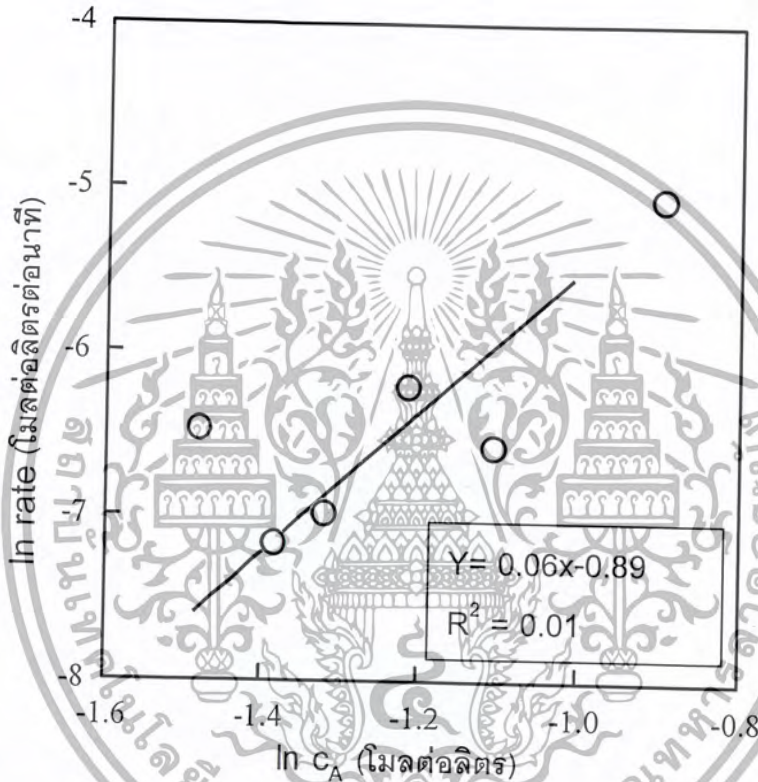
จากผลการทดลองพบว่าปริมาณไอโซนที่ละลายในน้ำเริ่มคงที่ ณ อัตราการป้อนออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที โดยเรียงจากมากไปน้อยคือ ถังกวน หอกระจายฟองที่ไม่มีแผ่นกระจาย

ฟอง และมีแผ่นกระจายฟอง ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกศึกษาอัตราการป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

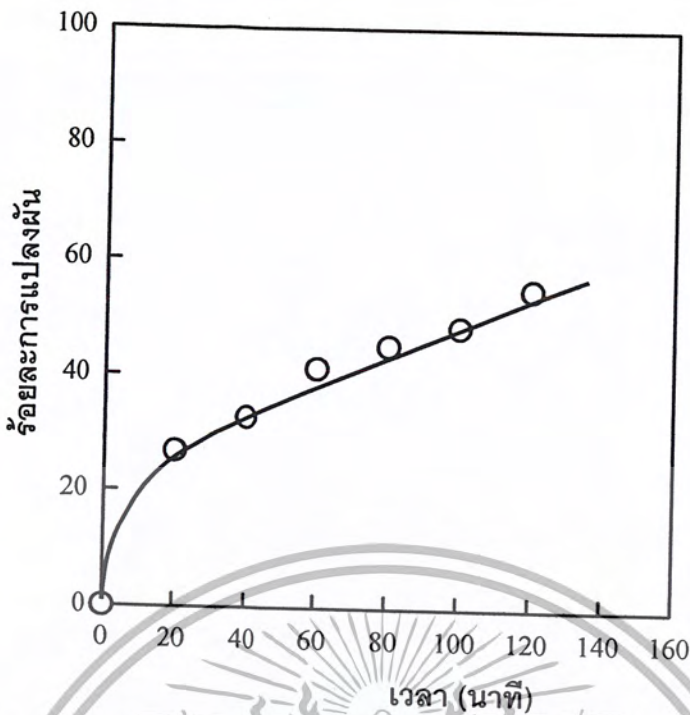
ก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาทีเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโซน มาใช้ในการบำบัดแอมโมเนียในน้ำด้วยวิธีไอโซเนชั่น

เมื่อป้อนออกซิเจนด้วยอัตราการป้อน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาทีพบว่าอัตราการป้อนที่วัดได้จริงจากการแทนที่น้ำเมื่อป้อนเข้าสู่ถังกวนจะไม่เกิดความดันลด แต่ในขณะที่เดียวกับที่ป้อนเข้าสู่หอกระจายฟอง จะเกิดความดันลด ทำให้จะเหลืออัตราการป้อนประมาณ 900 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งอาจส่งผลต่อการบำบัดแอมโมเนียในน้ำด้วย (ตารางภาคผนวก ข.1)

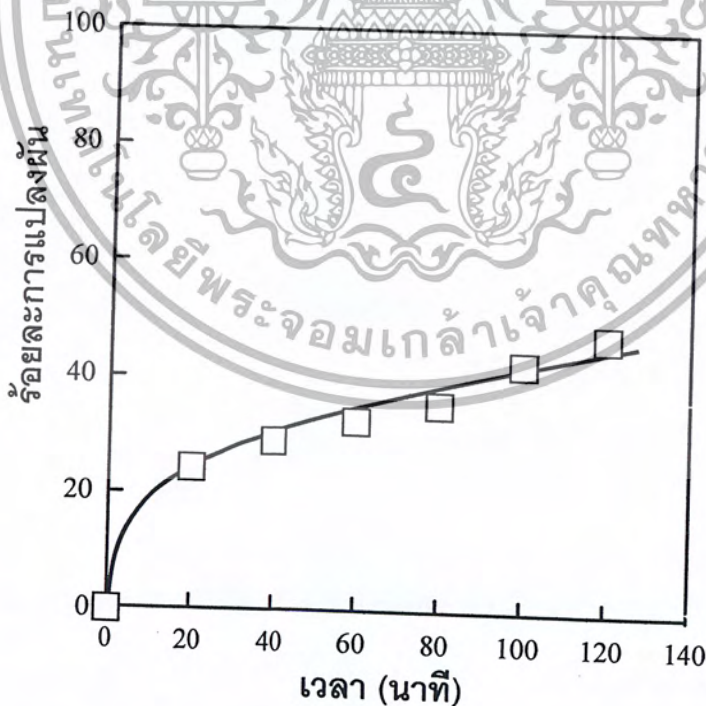


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการทำปฏิกิริยาในการหาความสัมพันธ์ของอันดับปฏิกิริยา ที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโซน

จากรูปที่ 4.2 เป็นการหาอันดับของปฏิกิริยา โดยใช้วิธีอนุพันธ์ (Differential Method) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (12) โดยจะพบว่าค่าความชันของกราฟจะเป็นอันดับของปฏิกิริยา และมีค่า 0.06 และจากอันดับของปฏิกิริยา พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาบ้างแต่ไม่มากนัก ดังนั้นการที่จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อาจทำได้โดยเพิ่มค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ หรือเพิ่มค่าการถ่ายโอนมวลโดยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง 2 วัฏภาคให้มากขึ้น



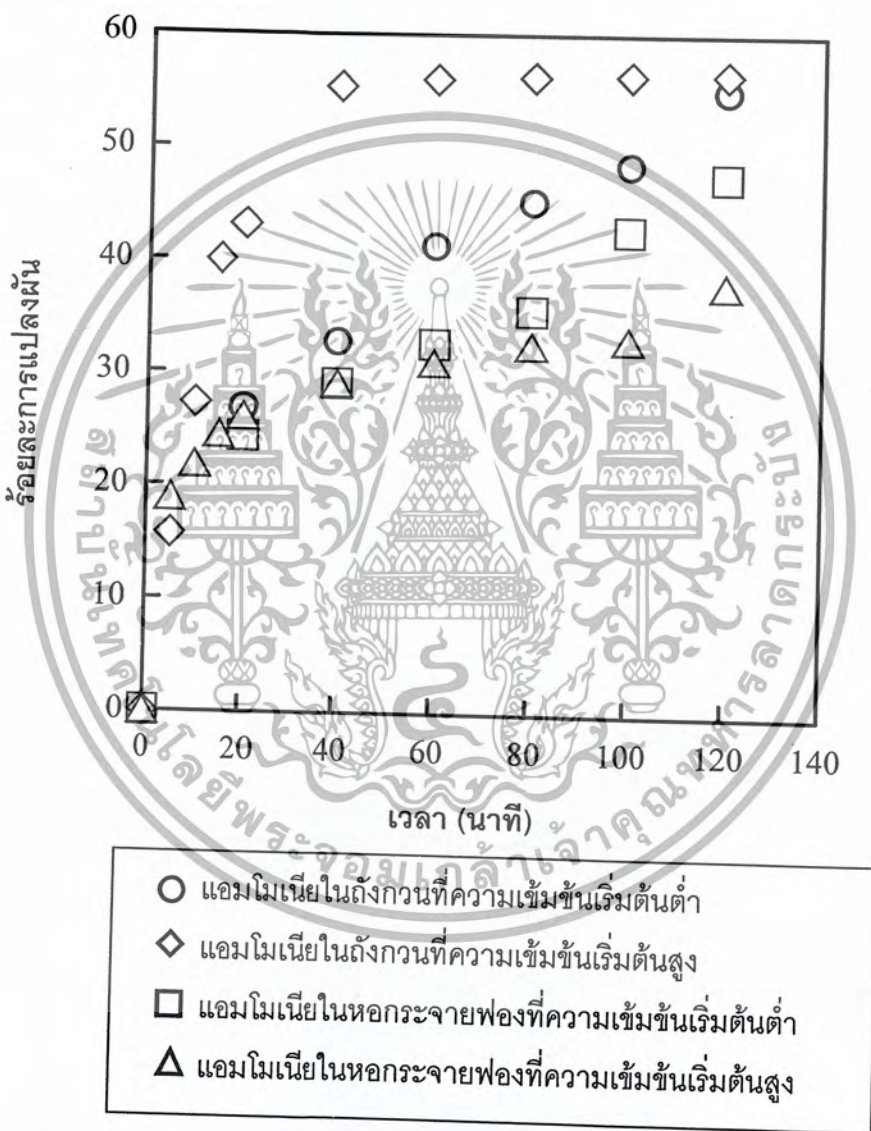
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละของการบำบัดแอมโมเนียในถัง กวน ที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละของการบำบัดแอมโมเนียในหอ กระจายฟอง ที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าร้อยละการแปลงผัน (%conversion) ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นเร็วมากสำหรับถังกวน (รูป 4.5) ส่วนในหอกระจายฟอง (รูป 4.6) ร้อยละการแปลงผันจะเพิ่มขึ้นเร็วเช่นกันแต่ไม่มากเท่าแบบกะ หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มจะเริ่มลดลง และพบว่าร้อยละการแปลงผันที่ 20 เกิดขึ้น ณ เวลาประมาณ 10 นาทีสำหรับถังกวนและประมาณ 30 นาทีสำหรับหอกระจายฟอง เนื่องจากความดันลดที่เกิดขึ้นในหอกระจายฟอง และในถังกวนมีการกวนที่ดีกว่าทำให้มีการกระจายของความเข้มข้นที่ดี



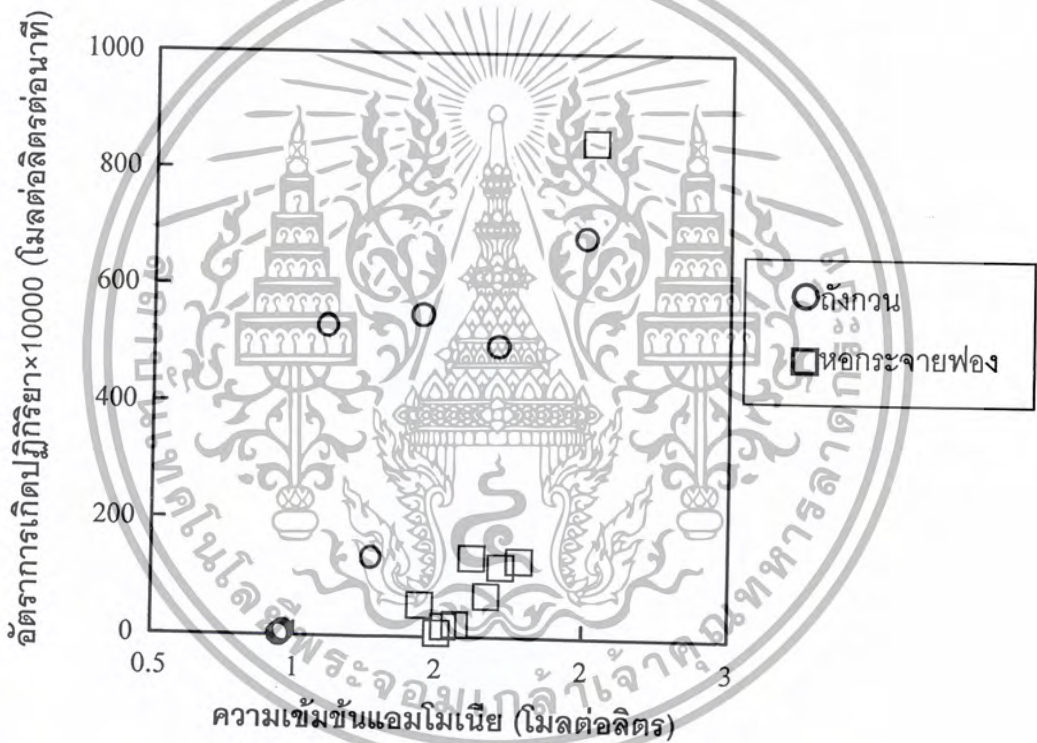
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละของการบำบัดแอมโมเนียในถังกวนและหอกระจายฟองก๊าซที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นต่างกัน ที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่ออนาที

จากรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละการแปลงผัน ทั้งในถังกวนและหอกระจายฟองที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียสูงและต่ำ จะพบว่า

เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะในหอกระจายฟอง ร้อยละการแปลงผันไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่เวลาสุดท้าย พบว่าที่ความเข้มข้นสูงจะมีร้อยละการแปลงผันมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะในถังกวน พบว่าที่ความเข้มข้นสูงจะมีร้อยละการแปลงผันสูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ แต่สุดท้าย ที่เวลา 120 นาที ร้อยละการแปลงผันมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างถังกวนกับหอกระจายฟอง พบว่าในถังกวนสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีกว่าในหอกระจายฟอง ซึ่งเนื่องมาจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ในถังกวนจะสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีมากในช่วงแรกเท่านั้น



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราในการทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นแอมโมเนียและอัตราการทำปฏิกิริยาในถังกวนหอกระจายฟองก๊าซที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นสูง

จากรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในถังกวนสูงกว่าในหอกระจายฟอง เนื่องมาจากในถังกวนมีการกวนที่ดีกว่า ทำให้มีการกระจายความเข้มข้นได้ดีกว่า อีกทั้งในหอกระจายฟองยังเกิดความดันลดขึ้น ทำให้อัตราการป้อนไอโซนที่สามารถเข้ามาบำบัดแอมโมเนียมีลดลงอีกด้วย

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์แบบกะ 2 ชนิด

รูปแบบถังปฏิกรณ์	ความเข้มข้นแอมโมเนีย		เวลา ณ การ แปลงผันเป็น ร้อยละ 20	ค่าร้อยละการแปลงผัน ณ เวลา 120 นาที
	ณ เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)	ณ เวลาสิ้นสุด		
ถังกวน	0.47		10	55.08
	2.17		6	56.51
หอกระจายฟองก้ำซ	0.52		30	47.48
	2.23		5	37.95

## สรุปผลการทดลองและแนวทางการศึกษาต่อ

ผลจากการทดลองบำบัดแอมโมเนียด้วยวิธีไอโซเนชั่น จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียโดยใช้ถังกวนและแบบหอกระจายฟอง พบว่าอัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโซนและรูปแบบของถังปฏิกรณ์มีผลต่อปริมาณไอโซนที่ละลายในน้ำ โดยในถังกวนมีความสามารถในการละลายที่ดีกว่าแบบหอกระจายฟอง อาจเนื่องจากการกวนที่ดี ทำให้มีการกระจายความเข้มข้นที่ดี และแบบหอกระจายฟองเกิดความดันลดลงกว่า ทำให้อัตราการป้อนก๊าซไอโซนเข้ามาบำบัดแอมโมเนียได้ลดลง จึงส่งผลถึงความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียในน้ำด้วย ด้วยเหตุนี้ถังกวนจึงสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีกว่าแบบหอกระจายฟองก๊าซ

อย่างไรก็ตามพบปัญหาจากการทดลองคือ การเลือกใช้วัสดุมาทำอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับการใช้ก๊าซไอโซนมาทำปฏิกิริยา จะส่งผลถึงปริมาณไอโซนที่ละลายในน้ำ เนื่องจากก๊าซไอโซนจะทำปฏิกิริยากับวัสดุนั้น จึงทำให้ มีปริมาณไอโซนที่สามารถละลายได้ลดลง และเมื่อใช้ไอโซนในการบำบัดแอมโมเนียพบว่าความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียจะเร็วในช่วงแรก ในเวลาต่อมาลดลง จึงควรหาวิธีการบำบัดที่คงประสิทธิภาพตลอดระยะเวลาที่ทำการบำบัด และควรศึกษาข้อมูลเครื่องมือที่นำมาใช้เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณก๊าซไอโซนในวัฏภาคก๊าซที่ภาวะสมดุล และสามารถเพิ่มความสามารถในการบำบัดแอมโมเนีย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] มั่นสิน และ มั่นรักษ์ ตันทูลเวศม์. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] กฤษณา สัตยวิจิตรและคณะ. 2546. "การบำบัดแอมโมเนียในน้ำด้วยวิธีโอโซนชัน." ปรินญาวิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Gottchalk, C. et.al. 2000. Ozonation of water and waste water. Berlin : Wiley-VCH.
- [4] Deckwer, Wolf-Dieter. 1991. Bubble Column Reactors. Translated by Cottrell, V. England : John Wiley & Sons Ltd.
- [5] Howard, F. 1947. The Birth of an Industry. New York : D.van Nostrand Company, Inc
- [6] Fogler, H. 1999. Element of Chemical Reaction Engineering. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey : Prentice Hall PTR.
- [7] พงศ์นรินทร์ มนต์บุญเลี้ยงและคณะ. "การออกแบบอุปกรณ์ป้อนอากาศ และ การศึกษาการถ่ายเทมวลของออกซิเจนในถังปฏิกรณ์หอฟองอากาศแบบสเลอรีเพื่อกำจัดกำมะถันในถ่านหินด้วยเชื้อจุลินทรีย์." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [8] Konsowa, A.H. "Decolorization of wastewater containing direct dye by ozonation in batch bubble column reactor." Desalination. Vol. 158. May. 2003. pp. 223-240.
- [9] Rice, R.G. and Nestzer, A. 1982. Handbook of ozone Technology and Application. Vol.2. Stoneham : Butterworth publisher.
- [10] ดั่ง พุทธศุภร์, (ผู้รวบรวม). 2544. ศัพท์วิทยาศาสตร์และศัพท์วิชาการ. เชียงใหม่ : หน่วยงานเทคโนโลยีการพิมพ์และสารสนเทศ สถาบันบริการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

## การทดลอง

### 1. การเตรียมสารเคมี

เตรียมน้ำยาเคมีทุกอย่างด้วยน้ำกลั่นปราศจากแอมโมเนีย

#### 1.1 การเตรียมสารเนสเลอร์

- 1.1.1 ละลายเมอร์คิวรีไอโอไดด์ ( $HgI_2$ ) 100 กรัมและโปแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 70 กรัม  
ในน้ำกลั่นเล็กน้อย แล้วค่อยๆผสมลงในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 160 กรัม  
ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร กวนสารตลอดเวลา
- 1.1.2 เจือจางสารโดยปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร
- 1.1.3 เก็บสารที่ได้ในขวดแก้วสีขาที่ปิดด้วยจุกยาง และเก็บไว้ในที่มืดและเย็น  
สารเนสเลอร์สามารถเก็บไว้ได้ 1 ปีในห้องปฏิบัติการ โดยสามารถตรวจสอบการเกิดสีได้  
กับแอมโมเนียไนโตรเจน ( $NH_3-N$ ) 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรในเวลา 10 นาที โดยหลังจากเติมสารเนส  
เลอร์ลงไปจะไม่ทำให้เกิดตะกอนกับแอมโมเนีย

#### 1.2 การเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน

- 1.2.1 เตรียมสารละลายสต็อกแอมโมเนีย โดยละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $NH_4Cl$ )  
3.819 กรัมในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร
- 1.2.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนีย โดยเจือจางสารละลายสต็อกแอมโม  
เนียม 10 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1,000 มิลลิลิตร  
{1 มิลลิลิตร = 1 ไมโครกรัมไนโตรเจน (N) = 12.2 ไมโครกรัมแอมโมเนีย ( $NH_3$ )}

#### 1.3 การเตรียมสารละลายแอมโมเนีย

- 1.3.1 นำสารละลายแอมโมเนียร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (Panreac Quimica SA) มา 1  
มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร
- 1.3.2 เตรียมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำสารละลาย  
แอมโมเนียในข้อ 1.3.1 มาปริมาตร 150 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้  
ครบ 1,000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 การเตรียมอดีทีเอ

ในการทดลองใช้เอทิลีนไดเอมีนเตตราอะซิติกแอซิด (EDTA) เพื่อป้องกันการตกตะกอนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมในตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ทำการกลั่นก่อนเติมสารเนสเลอร์

1.4.1 นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัมละลายในน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร

1.4.2 เติมไดโซเดียมเอทิลีนไดเอมีนเตตราอะซิเตทไฮเดรท 50 กรัมลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยนำสารไปอุ่นเพื่อให้ละลายได้ดีขึ้น

1.4.3 ทิ้งสารให้เย็น จากนั้นเติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร

## 2. การวิเคราะห์หาแอมโมเนียโดยวิธีเนสเลอร์ไลเซชัน

### หลักการ

วิธีเนสเลอร์ไลเซชันเป็นการเติมสารเนสเลอร์ ซึ่งเป็นสารละลายต่างแก่ของโปตัสเซียมเมอร์คิวริกไอโอไดด์ ( $K_2HgI_2$  หรือ  $2KI \cdot HgI_2$ ) ซึ่งรวมตัวกับแอมโมเนียในสารละลายต่างเพื่อเกิดเป็นคอลลอยด์สีเหลืองอมน้ำตาล ความเข้มของสีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแอมโมเนีย สีที่เกิดจากปฏิกิริยานเนสเลอร์ไลเซชันนี้สามารถดูดกลืนแสงช่วงคลื่นที่กว้าง ถ้าได้สีเหลืองแสดงว่ามีแอมโมเนีย-ไนโตรเจน โดยสามารถทราบปริมาณแอมโมเนียโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

### สารเคมี

1. น้ำยาอดีทีเอ
2. สารเนสเลอร์
3. สารละลายสต็อกแอมโมเนีย
4. สารละลายมาตรฐานแอมโมเนีย

### การวิเคราะห์

#### การสร้างกราฟมาตรฐาน

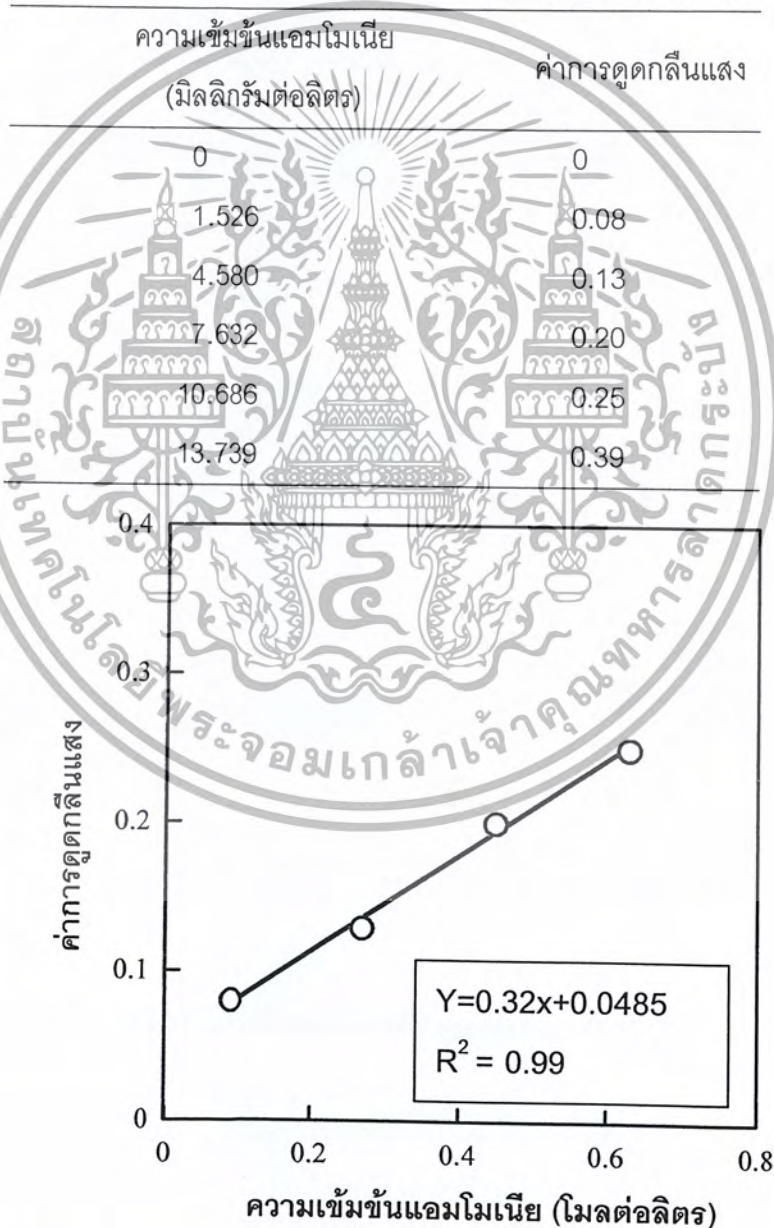
- นำสารละลายแอมโมเนียคลอไรด์ (1 มิลลิลิตร = 10 ไมโครกรัมไนโตรเจน) ปริมาตร 0,2, 6, 10, 14 และ 18 มิลลิลิตรมาเจือจางโดยปรับปริมาตรสารแต่ละขวดให้ครบ 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

- หยดสารละลายอดีทีเอลงไป 1 หยด เพื่อกำจัดสารรบกวนจำพวกแคลเซียม แมกนีเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หรือไอออนอื่นๆที่ทำให้เกิดความขุ่นหรือเกิดตะกอนกับเนสเลอร์
- เติมนสารเนสเลอร์ 2 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 15 นาทีเพื่อทำปฏิกิริยา
  - วัดค่าการดูดกลืนแสงโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
  - นำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านค่าได้พลอตกราฟกับความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียที่เตรียมไว้จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียกับความการดูดกลืนแสง (ช่วงความเข้มข้นต่ำ)

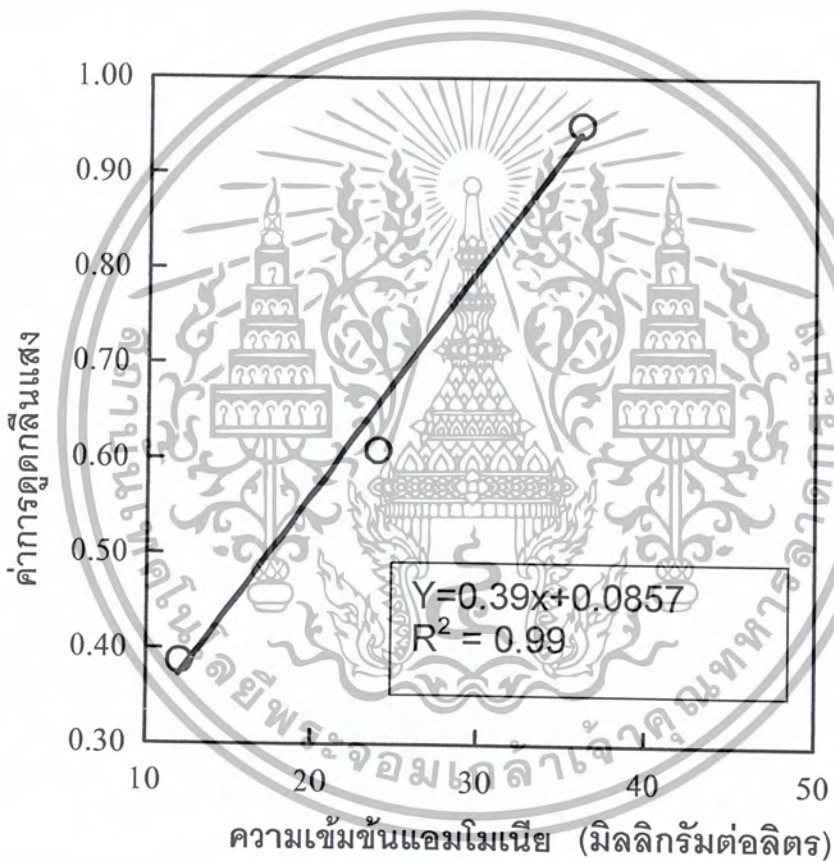


รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายแอมโมเนีย (ช่วงความเข้มข้นต่ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียกับค่าการดูดกลืนแสง (ช่วงความเข้มข้นสูง)

ความเข้มข้นแอมโมเนีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
12	0.387
24	0.609
36	0.950
48	0.957



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของแอมโมเนีย (ช่วงความเข้มข้นสูง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนออกซิเจนเข้าเครื่องผลิตไอโซนกับปริมาณไอโซนในถังกวน เวลา 10 นาที

อัตราการป้อนออกซิเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ปริมาณสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณไอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)
600	3.13	45.06
800	2.85	82.08
1000	3.25	93.60
1200	3.50	100.80
1400	3.53	101.76

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนออกซิเจนเข้าเครื่องผลิตไอโซนกับปริมาณไอโซนในถังกระจายฟองที่ใส่แผ่นกระจายฟอง เวลา 5 นาที

อัตราการป้อนออกซิเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ปริมาณสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณไอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)
600	0.80	23.04
800	1.35	38.88
1000	2.22	63.94
1200	2.28	65.73
1400	2.56	73.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนออกซิเจนเข้าเครื่องผลิตโอโซนกับปริมาณโอโซนในหอกระจายฟองที่ไม่ใส่แผ่นกระจายฟองเวลา 5 นาที

อัตราการป้อนออกซิเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณโอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)
600	0.82	23.53
800	1.48	42.72
1000	2.33	67.10
1200	2.38	68.61
1400	2.44	70.13

ตารางที่ ข.4 อัตราเร็วของก๊าซโอโซนที่ออกจากเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่อง 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที

ตำแหน่งที่วัดอัตราเร็ว	อัตราเร็วก๊าซออกซิเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)
ออกจากเครื่องผลิตก๊าซโอโซนโดยตรง	1090
ก๊าซที่เข้าสู่ถังกวน	1090
ก๊าซที่ออกจากตัวกระจายฟองจากหอกระจายฟอง	930

ตารางที่ ข.5 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำโดยวิธีโอโซนชั้นที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลาต่างๆในถังปฏิกรณ์แบบกะ

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	Conversion (%)
0	0.201	0.47	0
20	0.160	0.34	26.89
40	0.151	0.32	32.79
60	0.138	0.28	41.31
80	0.132	0.26	45.25
100	0.127	0.24	48.52
120	0.117	0.21	55.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย เริ่มต้นต่ำโดยวิธีโอโซเนชันในถังกวน

เวลาทำ ปฏิกิริยา	rate	$C_A$	ln rate	ln $C_A$
10	0.0063	0.408	-5.061	-0.896
30	0.0014	0.331	-6.577	-1.106
50	0.0020	0.297	-6.210	-1.215
70	0.0009	0.267	-6.983	-1.319
90	0.0008	0.250	-7.165	-1.384
110	0.0015	0.227	-6.472	-1.482

ตารางที่ ข.7 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงโดยวิธีโอโซเนชันที่อัตราการ บ้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลาต่างๆในถังกวน

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	Conversion (%)
0	0.951	2.17	0.00
5	0.814	1.83	15.77
10	0.715	1.58	27.27
15	0.605	1.30	39.98
20	0.578	1.23	43.10
40	0.472	0.97	55.36
60	0.466	0.95	56.05
80	0.464	0.95	56.28
100	0.463	0.94	56.40
120	0.462	0.94	56.51

ตารางที่ ข.8 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย เริ่มต้นสูงโดยวิธีโอโซเนชันในถังกวน

เวลาทำ ปฏิกิริยา (นาที)	rate	$C_A$	ln rate	ln $C_A$	rate x 10000
2.5	0.06846	1.999	-2.682	0.692	684.554
2.5	0.04990	1.703	-2.998	0.532	498.997
2.5	0.05517	1.440	-2.897	0.365	551.655
2.5	0.01354	1.268	-4.302	0.238	135.406
10	0.05316	1.102	-2.934	0.097	531.595
10	0.00075	0.961	-7.192	-0.040	7.523
10	0.00025	0.951	-8.291	-0.050	2.508
10	0.00013	0.947	-8.984	-0.054	1.254
10	0.00013	0.945	-8.984	-0.057	1.254

ตารางที่ ข.9 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำโดยวิธีโอโซนชันที่อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน 1.000 มิลลิเมตรต่อนาที ที่เวลาต่างๆในหอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่ข้างท่อ

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ไมลต่อลิตร)	Conversion (%)
0	0.201	0.47	0.00
20	0.179	0.40	14.43
40	0.165	0.36	23.61
60	0.153	0.32	31.48
80	0.142	0.29	38.69
100	0.132	0.26	45.25
120	0.128	0.25	47.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย เริ่มต้นต่ำโดยวิธีไอโซเนชันในหอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่ข้างท่อ

เวลาทำปฏิกิริยา (นาที)	rate	$C_A$
10	0.003401	0.44
30	0.002165	0.38
50	0.001855	0.34
70	0.001701	0.31
90	0.001546	0.27
110	0.000618	0.25

ตารางที่ ข.11 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำโดยวิธีไอโซเนชันที่อัตราการ บ้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลาต่างๆในหอกระจายฟองโดยเก็บ ตัวอย่างที่กลางท่อ

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	Conversion (%)
0	0.217	0.521	0.000
20	0.176	0.394	24.339
40	0.168	0.370	29.086
60	0.162	0.351	32.647
80	0.157	0.335	35.614
100	0.145	0.298	42.735
120	0.137	0.274	47.482

ตารางที่ ข.12 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย เริ่มต้นต่ำโดยวิธีไอโซเนชันในหอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่กลางท่อ

เวลาทำปฏิกิริยา(นาที)	rate	rate×10000	$C_A$
10	0.006339	63.39	0.457
30	0.001237	12.37	0.382
50	0.000928	9.28	0.360
70	0.000773	7.73	0.343
90	0.001855	18.55	0.317
110	0.001237	12.37	0.286

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ผลจากการบำบัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงโดยวิธีไอโซเนชันที่อัตราการ  
ป้อนก๊าซออกซิเจน 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลาต่างๆในหอกระจายฟองโดยเก็บ  
ตัวอย่างที่กลางท่อ

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ไมลต่อลิตร)	Conversion (%)
0	0.979	2.240	0.000
5	0.810	1.816	18.919
10	0.784	1.751	21.829
15	0.760	1.691	24.516
20	0.746	1.656	26.083
40	0.719	1.588	29.106
60	0.702	1.545	31.009
80	0.688	1.510	32.576
100	0.683	1.498	33.136
120	0.640	1.390	37.949

ตารางที่ ข.14 ผลจากการคำนวณแสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย  
เริ่มต้นสูงโดยวิธีไอโซเนชันในหอกระจายฟองโดยเก็บตัวอย่างที่กลางท่อ

เวลาทำ ปฏิกิริยา(นาที)	rate	rate×10000	C <sub>A</sub>
2.5	0.08475	847.543	2.028
7.5	0.01304	130.391	1.784
12.5	0.01204	120.361	1.721
17.5	0.00702	70.211	1.673
30	0.01354	135.406	1.622
50	0.00213	21.314	1.567
70	0.00176	17.553	1.528
90	0.00063	6.269	1.504
110	0.00539	53.912	1.444

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

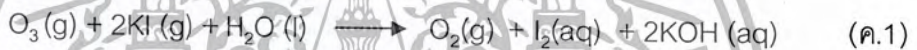
### การคำนวณ

#### การตรวจวัดปริมาณโอโซน

การตรวจวัดปริมาณของโอโซนในน้ำสามารถตรวจวัดได้หลายวิธี เช่น เทคนิคอุลตราไวโอเลต ไทรโฟโตเมทรี เทคนิคทางอเล็กโตรเคมี และวิธีการทางเคมี (ไทเทรชัน) ซึ่งวิธีทางเคมีนี้จะใช้หลักการคือ ใช้สารละลายที่เกิดปฏิกิริยาเฉพาะโอโซน โดยสารที่ใช้ต้องมีความจำเพาะสูง เช่น สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) ทำให้สารใหม่เกิดขึ้น สามารถหาปริมาณโอโซนได้โดยการไทเทรตกับสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไทโอซัลเฟต หรือ ฟีนิลาซีนออกไซด์

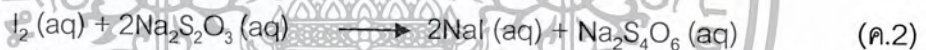
ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ

- การดูดซึมโอโซนโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์



สารละลายใสไม่มีสี  $\longrightarrow$  สารละลายสีเหลืองอมส้ม

- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 M โซเดียมไทโอซัลเฟต



สารละลายสีน้ำเงิน  $\longrightarrow$  สารละลายใสไม่มีสี

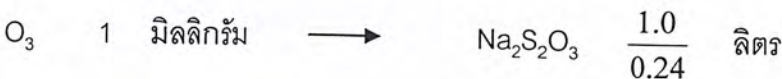
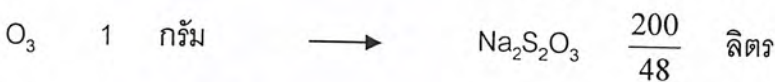
จาก 2 สมการข้างต้นสามารถคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นระหว่างปริมาณโอโซนที่ได้

ดังนี้

การเกิดโอโซน 1 โมล ใช้  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  2 โมล

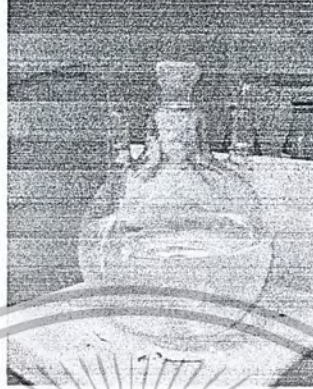


ใช้  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  0.01 M ในการไทเทรต



ดังนั้น ปริมาณ  $\text{O}_3$  (มิลลิกรัม) =  $0.24 \times$  ปริมาตร  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (มิลลิลิตร)

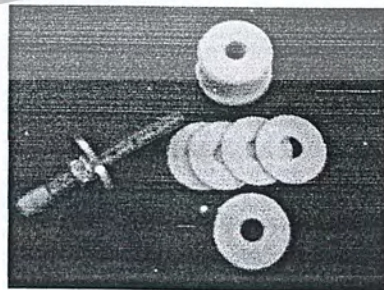
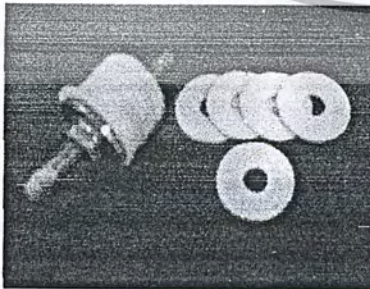
ภาคผนวก ง  
เครื่องมือและอุปกรณ์



รูปที่ ง.1 ถังกวนปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

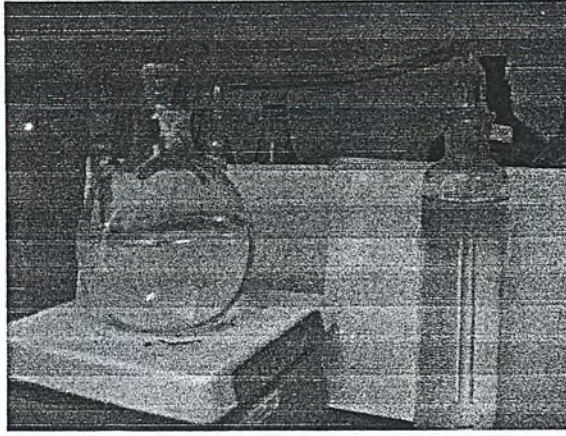


รูปที่ ง.2 หอกระจายฟอง

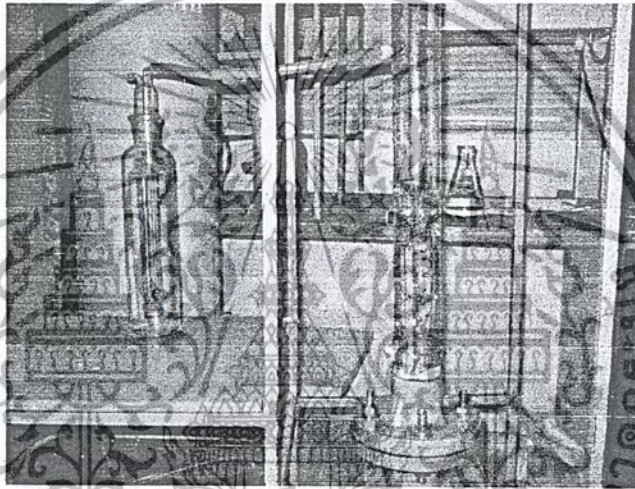


รูปที่ ง.3 ตัวกระจายฟองและแผ่นกระจายฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.๔ ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองในถังกวน



รูปที่ ๑.๕ ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองในหอกระจายฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้