

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้โอโซน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 36746  
วัน, เดือน, ปี 28 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# REMOVAL OF HEAVY METALS FROM WASTEWATER USING OZONE



**Mr. Nattaphol Vijitchalermpong**  
**Mr. Thanonchai Boonnathee**

**A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

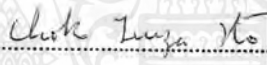
**1999**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้โอโซน  
โดย นายณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์  
นายธนัญชัย บุญนะที่  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.โจโกะ เทเรซ่า อีโต้  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ดร.โจโกะ เทเรซ่า อีโต้)

  
.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)

  
.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

**นภกร ัมพิพิธ**  
.....กรรมการ  
(อาจารย์นภกร ัมพิพิธ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้โอโซน  
 โดย นายณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์  
 นายธนัญชัย บุญนะที่  
 อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.โจโกะ เทเรซา อีโต้  
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์  
 ปริญญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีสารประเภทโลหะหนักได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล สังกะสี เป็นต้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย สำหรับการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ มีความเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการเติมโอโซนหรือสารออกซิไดซ์ เพื่อออกซิไดซ์โลหะหนักให้ตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ( $M(OH)_3$ ) วิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถตกตะกอนโลหะหนักต่าง ๆ ออกจากกันได้ โดยใช้แผนภูมิความต่างศักย์-pH สำหรับโลหะหนักแต่ละชนิด กล่าวคือโลหะหนักดังกล่าวสามารถดึงกลับมาใช้ใหม่ ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ โอโซนจะไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในน้ำ

ในโครงการนี้ได้ดำเนินการทดลองการเติมโอโซนสำหรับเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล ที่มีความเข้มข้น 100 ppm โดยการพ่นโอโซนในปริมาณ 20.88 มิลลิกรัม/ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า สามารถแยกเหล็กออกจากโคบอลต์และนิกเกิลที่ pH 5 และแยกโคบอลต์ออกจากนิกเกิลได้บางส่วนที่ pH 8 โดยสามารถกำจัดเหล็กจากความเข้มข้น 100 ppm เหลือเพียง 1.1 ppm ในเวลา 90 นาที ที่ pH 5 และสามารถคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้เท่ากับ  $-0.17$  และ  $3.52 \times 10^{-6}$  ตามลำดับ ในการกำจัดโคบอลต์ พบว่าสามารถกำจัดได้จากความเข้มข้น 100 ppm เหลือ 57.1 ppm ในเวลา 90 นาที ที่ pH 8 และสามารถคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้เท่ากับ  $-0.5214$  และ  $6.82 \times 10^{-10}$  ตามลำดับ สำหรับนิกเกิลไม่สามารถกำจัดได้หรือกำจัดได้น้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของแก๊สโอโซนที่ใช้ในการทดลองมีน้อยเกินไป

Report Title Removal of Heavy Metals from Wastewater Using Ozone  
 By Mr.Nattaphol Vijitchalermpong  
 Mr.Thanonchai Boonnathee  
 Advisor Dr.Choko Tereza Ito  
 Co-Advisor Assist.Prof. Dr.Phisan Nakpipat  
 Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering  
 Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

Industrial wastewater generally contains heavy metals, like iron, cobalt, nickel, zinc etc. that are harmful to living organisms. For treatment of such wastewater, it is possible to use ozone or oxidizer to make them precipitate as  $M(OH)_3$ . This method has an advantage in that it is possible to precipitate heavy metals separately by using Potential-pH diagram for each heavy metals. That is, heavy metals can be recovered from wastewater for reuse. Another advantage is that ozone will not contaminate water.

In this project, ozonation experiments were performed for iron, cobalt and nickel by injecting 20.88 mg/h of ozone in solutions containing 100 ppm of each metal. From the experiments it was found that iron could be separated from cobalt and nickel at pH 5 and cobalt could be partially separated from nickel at pH 8 which iron was removed from 100 ppm  $Fe^{2+}$  to 1.1 ppm  $Fe^{2+}$  at pH 5 after 90 minutes of ozonation. The reaction order and reaction rate constant for Fe oxidation-precipitation reaction were -0.17 and  $3.52 \times 10^{-6}$ , respectively. In the case of cobalt, it was found that  $Co^{2+}$  concentration was decreased from 100 ppm to 57.1 ppm after 90 minutes at pH 8. The reaction order and reaction rate constant for Co oxidation-precipitation reaction was -0.5214 and  $6.82 \times 10^{-10}$ , respectively. In the case of nickel it was found that  $Ni^{2+}$  concentration was not almost changed because amount of used ozone was very small in comparison with the required amount.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ได้รับความช่วยเหลือจาก ดร. โจโกะ เทเรซ่า อีโต้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ ผศ.ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ มาเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังมีหน่วยงานและบุคลากรอีกหลายท่านที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ และอยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้ ดังรายนามต่อไปนี้

ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เป็นอย่างดี

คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและสอนการใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

รศ.ดร. รัตติกอ วรากุลศิริพันธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง pH มิเตอร์

รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

อ. นภกร อัมพิพิธ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยตรวจและแก้ไขปริญญาานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำโรงปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการทำโครงการครั้งนี้

ณรรจุพล วิจิตรเฉลิมพงษ์

ธนัญชัย บุญนะที

1 พฤษภาคม 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูปภาพ .....	ช
รายการสัญลักษณ์ .....	ซ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 มูลเหตุจูงใจ .....	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของโอโซนชั้น .....	9
2.1 โอโซน .....	9
2.2 คุณสมบัติของแก๊สโอโซน .....	9
2.3 การสังเคราะห์แก๊สโอโซน .....	13
2.4 อุปกรณ์และระบบเติมโอโซน .....	20
2.5 การประยุกต์ใช้งานโอโซน .....	27
บทที่ 3 การเกิดออกซิเดชันทางเคมี .....	32
3.1 แอคติวิตีและสัมประสิทธิ์แอคติวิตี .....	32
3.2 สมการของเนินสต์ .....	34
3.3 แผนภูมิความต่างศักย์-pH .....	35
บทที่ 4 การดำเนินงาน .....	40
4.1 ขั้นตอนการทดลอง .....	40
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	47
5.1 ผลการทดลอง .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	50
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	57
6.1 สรุปผลการทดลอง .....	57
6.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการต่อไป .....	60
บรรณานุกรม .....	61
ภาคผนวก .....	63
ภาคผนวก ก .....	64
ภาคผนวก ข .....	71
ภาคผนวก ค .....	74
ภาคผนวก ง .....	76
ภาคผนวก จ .....	79
ภาคผนวก ฉ .....	85



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบการละลายของไอโซนและออกซิเจนในน้ำ ..... 10
ตารางที่ 2.2	สมบัติของแก๊สไอโซนบริสุทธิ์ ..... 14
ตารางที่ 2.3	เปรียบเทียบความเข้มข้นของไอโซน (% โดยน้ำหนัก) เมื่อใช้อากาศและออกซิเจนเป็นแก๊สป้อน ..... 22
ตารางที่ 2.4	เปรียบเทียบรูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน ..... 23
ตารางที่ 3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบเหล็ก-น้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ..... 37
ตารางที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบโคบอลต์-น้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ..... 38
ตารางที่ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบนิกเกิล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ..... 39
ตารางที่ 5.1	ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) ที่ใช้ในการไตเตรต และปริมาณของแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้ ..... 47
ตารางที่ 5.2	ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ ..... 48
ตารางที่ 5.3	ความเข้มข้นของโคบอลต์ที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ ..... 48
ตารางที่ 5.4	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ ..... 49
ตารางที่ 5.5	ค่า $\log V$ ที่ pH 3, 4, และ 5 สำหรับเหล็ก ..... 54
ตารางที่ 5.6	ค่า $\log V$ ที่ pH 3, 4, 5, 6, 7, และ 8 สำหรับโคบอลต์ ..... 55
ตารางที่ 5.7	ค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาสำหรับเหล็กและโคบอลต์ ..... 56

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนภูมิแนวความคิดและการออกแบบโครงงาน .....	4
รูปที่ 1.2 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	6
รูปที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่การละลายของแก๊สไอโซน .....	11
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสลายตัวของแก๊สไอโซน .....	12
รูปที่ 2.3 เครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนโดยใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรน่า .....	16
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนแบบออกโตเพลต .....	18
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนแบบท่อ .....	18
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนแบบโลเธอร์เพลต .....	19
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบที่สำคัญในระบบการเติมไอโซน .....	20
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของระบบเตรียมแก๊ส .....	21
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สไอโซนแบบออกโต .....	23
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สไอโซนแบบไหลบรรจบกัน .....	24
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สไอโซนแบบไหลสวนทางกัน .....	24
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สไอโซนแบบถังปั่นกวาน .....	25
รูปที่ 2.13 ปฏิกริยาออกซิเดชันของแก๊สไอโซนกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย .....	27
รูปที่ 3.1 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบเหล็ก-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร .....	37
รูปที่ 3.2 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบโคบอลต์-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร .....	38
รูปที่ 3.3 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบนิกเกิล-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร .....	39
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กกับเวลา .....	50
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโคบอลต์กับเวลา .....	50
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลกับเวลา .....	51
รูปที่ 5.4 เส้นแนวโน้มระหว่างความเข้มข้นของเหล็กกับเวลา .....	53
รูปที่ 5.5 เส้นแนวโน้ม ระหว่างความเข้มข้นของโคบอลต์กับเวลา .....	54
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง logV กับ pH ของเหล็ก .....	55
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง logV กับ pH ของโคบอลต์ .....	56
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่ pH 5 .....	57
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่ pH 8 .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$a$	: ความว่องไวของสาร
$b$	: ความยาวของอะตอมเซลล์
$C$	: ความเข้มข้น, โมล/ลิตร
$C^0$	: ความเข้มข้นที่สภาวะมาตรฐาน = 1 โมล/ลิตร
$c$	: ค่าความเร็วของแสง = $3 \times 10^{10}$ ซม./วินาที
$d$	: ความหนาของไดอิเล็กทริก, นิ้ว
$E$	: พลังงานโฟตอน, เอิร์ก
$E$	: ความต่างศักย์, โวลต์ (สมการที่ 3.9)
$E_c$	: พลังงานที่สถานะแฉะ
$E_0$	: พลังงานที่สถานะพื้น
$e$	: ค่าไดอิเล็กทริก, ฟารัด/นิ้ว
$F$	: ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 96,485 คูลอมป์/โมล
$f$	: ความถี่ของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน, เฮิร์ตซ์
$g$	: ความกว้างของช่องอากาศ, นิ้ว
$g_c$	: น้ำหนักทางสถิติของสถานะแฉะ
$g_0$	: น้ำหนักทางสถิติของสถานะพื้น
$h$	: ค่าคงที่ของพลังค์ = $6.63 \times 10^{-27}$ เอิร์ก.วินาที
$I$	: ความเข้มแสงหลังถูกดูดกลืนโดยอะตอม
$I_0$	: ความเข้มแสงก่อนถูกดูดกลืนโดยอะตอม
$K_s$	: ค่าคงที่การละลายของไอโซน
$k$	: ค่าคงที่ของโบลซ์มาน = $1.3805 \times 10^{-16}$ เอิร์ก.เคลวิน
$k$	: ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมล <sup>(1-n)</sup> .ลิตร <sup>(n-1)</sup> .นาที่ <sup>-1</sup> (สมการที่ 5.2)
$k_0$	: ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมล <sup>(1-m-n)</sup> .ลิตร <sup>(m+n-1)</sup> .นาที่ <sup>-1</sup>
$k_1, k_2$	: ค่าคงที่
$m, n$	: อันดับของปฏิกิริยา
$N_c$	: จำนวนอะตอมที่สถานะแฉะ
$N_0$	: จำนวนอะตอมที่สถานะพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n$	:จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในครึ่งปฏิกิริยา
$O_3$	:ความเข้มข้นของโอโซน, มิลลิกรัม/ลิตร
$P_{O_3}$	:ความดันย่อยของแก๊สโอโซน
$P$	:ความดันแก๊สในช่องอากาศ, ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
$R$	:ค่าคงตัวของแก๊ส, แคลอรี/โมล-เคลวิน
$T$	:อุณหภูมิ, เคลวิน
$t$	:เวลา, นาที
$V$	:ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน
$V$	:อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย, โมล/ลิตร-นาที (สมการที่ 5.2)

อักษรกรีก

$\Delta G$	:พลังงานอิสระ, กิโลจูล/โมล
$[H^+]$	:ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน, โมล/ลิตร
$[M(OH)_3]$	:ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่อยู่ในรูป $2+$ , โมล/ลิตร
$[O_3]$	:ความเข้มข้นของแก๊สโอโซน, โมล/ลิตร
$\epsilon$	:ค่าการดูดซึมแสงเชิงโมล
$\alpha, \beta, \gamma$ และ $\delta$	:สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารชนิดต่าง ๆ
$\gamma_0$	:ค่าสัมประสิทธิ์ความว่องไว, ไม่มีหน่วย
$v$	:ความถี่ของแสง, เฮิรตซ์
$\lambda$	:ความยาวคลื่น, นาโนเมตร

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 มูลเหตุจูงใจ

ปัจจุบันการลดของเสียและการรีไซเคิลเป็นทฤษฎีที่สำคัญ สำหรับการศึกษในสาขาของการป้องกันมลภาวะในอุตสาหกรรมโลหะการ เช่น อุตสาหกรรมทำเหล็กกล้า อุตสาหกรรมถลุงแร่โลหะ อุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องนำโลหะจากน้ำเสียกลับมาใช้ เนื่องจากปัญหาด้านมลภาวะและการขาดแคลนแหล่งของโลหะในอนาคต อุตสาหกรรมเหล่านี้ได้มีการพัฒนากระบวนการบำบัดจำนวนมาก เพื่อนำโลหะหนักจากน้ำเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมกลับมาใช้อีก

โลหะหนักเป็นสารพิษที่อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย เช่น มนุษย์ สัตว์ชนิดต่าง ๆ หรือแม้กระทั่งจุลชีพที่มีขนาดเล็ก โลหะหนักมีอยู่หลายชนิดได้แก่ เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) และแมงกานีส (Mn) เป็นต้น ในการกำจัดโลหะหนัก (M) ดังกล่าวออกจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ( $M(OH)_2$ ) แต่ถ้าให้สารละลายมีโลหะมากกว่าหนึ่งชนิดแล้ว การแยกชนิดของโลหะดังกล่าวออกจากกันด้วยวิธีดังกล่าวทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม หากใช้หลักการออกซิไดซ์เพื่อทำให้โลหะหนักตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ( $M(OH)_3$ ) จะสามารถแยกชนิดของโลหะออกจากกันได้ โดยใช้แผนภูมิความต่างศักย์-pH (Potential-pH Diagram) ของโลหะแต่ละชนิด นอกจากนี้เพื่อให้ผลการกำจัดมีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงมีแนวความคิดที่จะนำแก๊สโอโซนมาเป็นตัวออกซิไดซ์โลหะหนักดังกล่าว เพราะแก๊สโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงมาก และไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในน้ำภายหลังจากการทำปฏิกิริยา

## 1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาแผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบโลหะหนัก-น้ำ
- 2) เพื่อศึกษาการตกตะกอนของโลหะหนักโดยการออกซิไดซ์ด้วยแก๊สไอโซน
- 3) เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์วิธีการเติมไอโซน ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดโลหะหนัก
- 4) เพื่อศึกษา pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะเหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล ด้วยแก๊สไอโซนเพื่อใช้ในการแยกชนิดของโลหะหนัก
- 5) เพื่อศึกษาอัตราเร็วและอันดับของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยแก๊สไอโซน

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ศึกษาคุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้แก๊สไอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย
- 2) ศึกษาหลักการการออกซิไดซ์โลหะหนักด้วยแก๊สไอโซน
- 3) สร้างแผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบโลหะหนัก-น้ำ
- 4) ทดลองหาปริมาณของแก๊สไอโซนจากเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน
- 5) ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะหนักโดยแก๊สไอโซน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ pH
- 6) หาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาการออกซิเดชันโลหะด้วยแก๊สไอโซน

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 1.4.1 การวางแผนงาน

ในการวางแผนในการดำเนินงานของโครงการนี้ จะแบ่งระยะการทำงานออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงการศึกษาข้อมูล และช่วงการดำเนินงาน โดยในแต่ละช่วงมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

#### 1.4.1.1 การศึกษาข้อมูล

ในช่วงการศึกษาข้อมูลนี้ ได้เริ่มจากการศึกษาหาข้อมูลจากหนังสือ วารสารและบทความทางวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ ซึ่งเป็นแหล่งข้อมูลค้นคว้าทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎี และได้นำแคตตาล็อกสินค้าที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้มาศึกษารายละเอียดของรูปแบบ และโครงสร้างของอุปกรณ์ ส่วนในการสืบค้นราคานั้นได้จากการสอบถามบริษัทผู้ผลิตที่ลงโฆษณาตามหน้านิตยสารต่าง ๆ และจากสมุดหน้าเหลือง

#### 1.4.1.2 การดำเนินงาน

ในช่วงระยะเวลาในการดำเนินงานนี้ เป็นช่วงที่ดำเนินงานต่อจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมา โดยจะกำหนดกิจกรรมต่าง ๆ ที่ต้องทำ เพื่อให้เป็นระบบและง่ายต่อการควบคุมการดำเนินงานของโครงการ

การวางแผนการดำเนินงานได้แบ่งเป็นงานหลัก ๆ ออกจากกัน และกำหนดลำดับก่อนหลังตามลำดับความสำคัญในการทำงาน และงานย่อย ๆ รวมไปถึงการบันทึกการทำงาน เพื่อจัดทำเอกสารแทรกไปในกิจกรรมต่าง ๆ ตามความเหมาะสม

#### 1.4.2 แนวความคิดและการออกแบบโครงการ

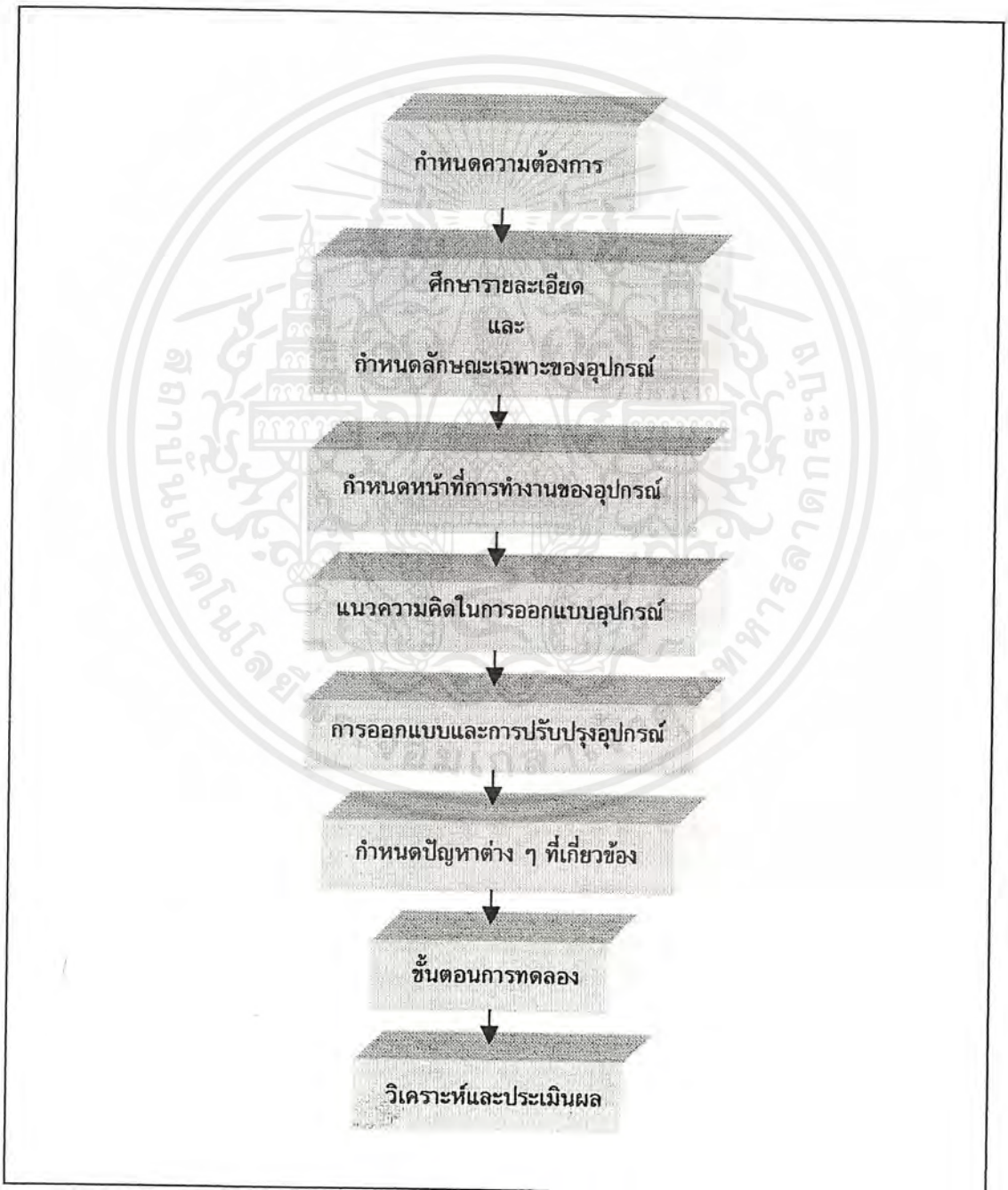
สำหรับขั้นตอนนี้ ได้รวบรวมแนวความคิดและประสบการณ์ต่าง ๆ รวมทั้งข้อมูลที่ได้ศึกษา มาประชุมและสรุปผลออกมาเป็นแนวความคิดเบื้องต้นในการออกแบบ แสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 1.1

##### 1.4.2.1 การกำหนดความต้องการ

ในการกำหนดความต้องการนั้น เบื้องต้นจะต้องทราบความต้องการพื้นฐานของโครงการ ซึ่งโครงการนี้ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโดยวิธีการเติมโอโซน สืบเนื่องจากข้อบกพร่องที่มีอยู่ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมแบบเดิม ซึ่งไม่สามารถนำโลหะหนักที่แยกได้กลับมาใช้ได้อีก และยังเกิดปัญหาความเป็นพิษจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงสามารถกำหนดความต้องการได้ดังนี้

- 1) อุปกรณ์ทำปฏิกิริยาแก๊สโอโซนกับน้ำในระดับปฏิบัติการ
- 2) อุปกรณ์ในการกำจัดแก๊สโอโซนที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา เนื่องจากแก๊สโอโซนเป็นแก๊สพิษ ถ้าปล่อยออกสู่บรรยากาศในปริมาณมาก ๆ อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้

- 3) แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของโลหะเหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล
- 4) ผลการทดลองที่ได้ อาทิเช่น สภาพในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป



รูปที่ 1.1 แผนภูมิแนวความคิดและการออกแบบโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4.2.2 การศึกษารายละเอียดและกำหนดลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์

จากที่ได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับโครงการ รวมทั้งศึกษาอุปกรณ์และสารเคมีจากแคตตาล็อกต่าง ๆ เพื่อกำหนดลักษณะของชุดอุปกรณ์ทำปฏิกิริยาแก๊สไอโซนกับน้ำพร้อมอุปกรณ์กำจัดแก๊สไอโซนที่หลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยา

เนื่องจากแก๊สไอโซนเป็นสารที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูง เพราะฉะนั้นวัสดุที่ใช้ในกระบวนการจำเป็นต้องระมัดระวังอย่างมาก วัสดุจำพวกยางหรือพลาสติกบางชนิด นีโอพรีน อีพดีเอ็ม (EPDM) หรืออะลูมิเนียม ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ แต่ควรเลือกใช้วัสดุจำพวกเหล็กกล้าไร้สนิม แก้ว ไฮปาลอน เทฟลอน คอนกรีต เป็นต้น ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้วัสดุประเภทแก้ว เพราะแก้วสามารถทำให้เป็นระบบปิดได้ง่าย และได้กำหนดลักษณะเฉพาะในการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

1) เครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากแก้ว (Glass reactor) ขนาดปริมาตร 1 ลิตร โดยออกแบบให้เป็นระบบปิด มีช่องทางแก๊สเข้าและออก ช่องสำหรับใส่ pH มิเตอร์ และช่องสำหรับใส่บิวเรต

2) เครื่องกำจัดแก๊สไอโซนที่หลีกเลี่ยงการทำปฏิกิริยา ขนาดปริมาตร 500 มิลลิลิตร พร้อมช่องทางให้แก๊สเข้าและออก

#### 1.4.2.3 การกำหนดหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นแก้วขนาดปริมาตร 1 ลิตร เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาไอโซเนชัน แก๊สไอโซนกับน้ำจะถูกลำเลียงให้สัมผัสกันภายในเครื่องนี้ ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนกับเครื่องเติมไอโซน

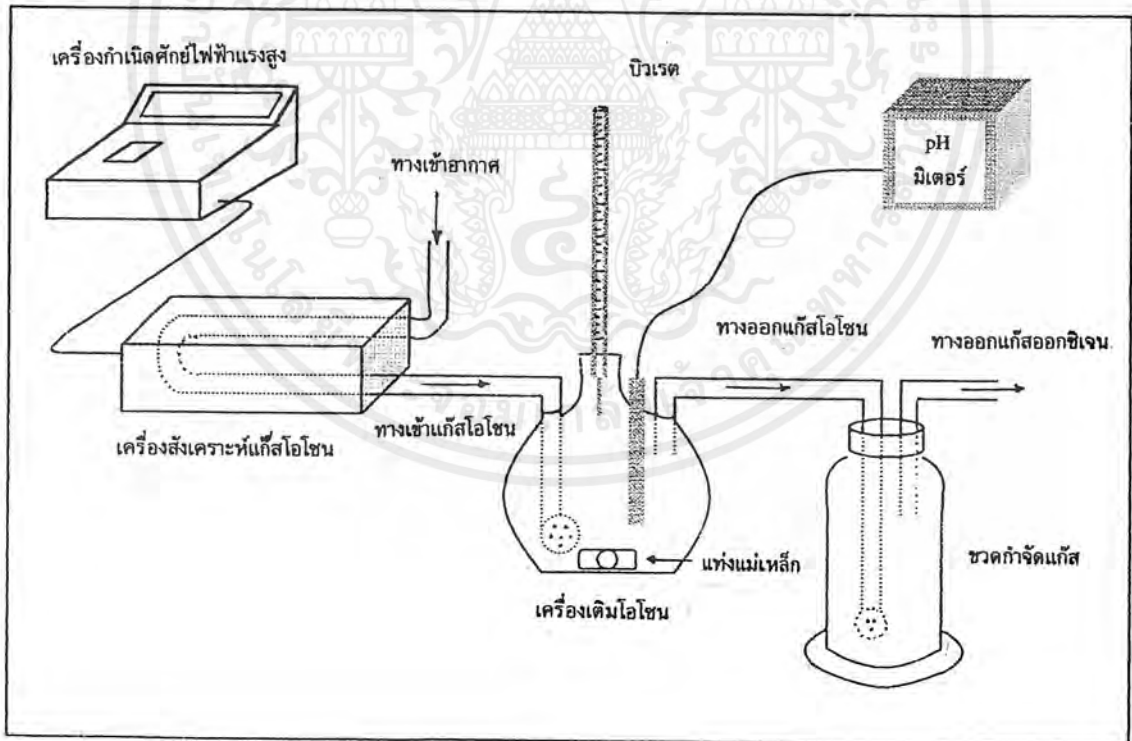
เครื่องกำจัดแก๊สไอโซนที่หลีกเลี่ยงการทำปฏิกิริยาหรือส่วนทำลายแก๊สไอโซน ขนาดปริมาตร 500 มิลลิลิตร เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กำจัดแก๊สไอโซนที่หลีกเลี่ยงการทำปฏิกิริยาจากส่วนของเครื่องทำปฏิกิริยา ซึ่งจะต้องมีอุปกรณ์ต่อเชื่อมโยกัน เพื่อป้องกันแก๊สไอโซนออกสู่บรรยากาศ

#### 1.4.2.4 แนวความคิดในการออกแบบอุปกรณ์

เมื่อได้ลักษณะเฉพาะขั้นต้นรวมทั้งหน้าที่ของอุปกรณ์แต่ละชนิดแล้ว จึงได้เริ่มระดมความคิดในการคิดหารูปร่างลักษณะต่าง ๆ ที่อาจเป็นไปได้ของอุปกรณ์ ดังจะได้แสดงต่อไป

#### 1.4.2.5 การออกแบบและปรับปรุงอุปกรณ์

นำข้อมูลต่าง ๆ ที่รวบรวมได้และลักษณะเฉพาะที่กำหนด มาออกแบบรูปร่าง ลักษณะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ ซึ่งเมื่อได้รูปแบบที่เหมาะสมแล้วจะต้องสั่งให้บริษัทผลิตขึ้น โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4.2.6 การกำหนดปัญหาต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการ

ผู้ดำเนินโครงการได้รวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานเป็นข้อ ๆ เพื่อเตรียมวางแผนและหาแนวทางป้องกันและแก้ไขต่อไป ดังนี้

- 1) ปัญหาทางด้านงบประมาณ เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในช่วงนี้เศรษฐกิจของประเทศอยู่ในสภาวะที่กำลังฟื้นตัว ทำให้เกิดการติดขัดในการจัดหางบประมาณสำหรับการดำเนินงานอยู่บ้าง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองบางส่วนจะต้องสั่งผลิตจากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งราคาจะสูงมาก
- 2) ปัญหาด้านความพร้อมของเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนที่มีอยู่ซึ่งไม่สามารถทดลองในสภาวะที่เหมาะสมกว่านี้ได้
- 3) ปัญหาทางการใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
- 4) ปัญหาของความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน คือ การขาดประสบการณ์และความชำนาญในการปฏิบัติงาน จึงอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

โดยมีแนวทางในการป้องกันและแก้ไขดังนี้

- 1) ทำการจัดสรรงบประมาณเป็นช่วง ๆ เพื่อสะดวกในการเบิกจ่าย
- 2) ในช่วงที่ต้องรอให้เครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนพร้อมใช้งาน ควรจะใช้เวลาว่างในส่วนนี้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ซึ่งอาจจะทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมหรือเตรียมการทดลองให้พร้อม

3) ทำการจัดแผนการและตารางเวลาให้เหมาะสม

4) กระตุ้นให้ผู้ปฏิบัติงานมีจิตสำนึก ตื่นตัว และมีความรอบคอบ

ในการทำงาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการออกซิไดซ์โลหะหนักด้วยไอโซนได้
- 2) สามารถนำหลักการออกซิไดซ์โลหะหนักด้วยไอโซนมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาประยุกต์ใช้กับการแยกชนิดของโลหะหนักจากน้ำเสีย
- 4) ได้รู้จักการทำงานเป็นกลุ่ม การวางแผน และการควบคุมการทำงาน ให้ลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการของโอโซนชั้น

#### 2.1 โอโซน

โอโซน มาจากภาษากรีกว่า “Ozein” ซึ่งหมายถึง กลิ่น [1] ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ โอโซน ( $O_3$ ) มีสถานะเป็นแก๊สเกิดจากอะตอมของออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งจะไม่เสถียรที่สภาวะดังกล่าว แต่เราสามารถสังเคราะห์ได้โดยโอโซนโดยการผ่านอากาศ หรือ ออกซิเจนเข้าไปในสนามไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งทำให้พันธะโมเลกุลของออกซิเจนแตกออกอยู่ในรูป แรดิคัลของออกซิเจน และจากนั้นแรดิคัลของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนเกิดเป็น โอโซน การสลายตัวของแก๊สโอโซนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิหรือ pH เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การสลายตัวของแก๊สโอโซนจะถูกรบกวนเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) แรดิคัลอิสระที่เกิดจากการสลายตัวของโอโซน ตัวถูกละลายอินทรีย์ ของแข็งอัลคาไลน์ โลหะทรานซิชัน โลหะออกไซด์ และคาร์บอน เป็นต้น

#### 2.2 คุณสมบัติของแก๊สโอโซน

แก๊สโอโซนมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 และมีจุดเดือดเท่ากับ  $-112$  องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติ (1 atm) ซึ่งจะอยู่ในสภาวะที่สามารถระเหยได้ง่าย เมื่อสัดส่วนของความเข้มข้นระหว่างโอโซนกับออกซิเจนมีค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นของโอโซน การระเหยจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสารต่าง ๆ เพียงเล็กน้อย เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา สารอินทรีย์ เป็นต้น หรือได้รับการกระตุ้นจากประกายไฟของไฟฟ้า หรือแม้แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันอย่างกะทันหัน แก๊สโอโซนมีกลิ่นที่สามารถตรวจสอบได้แม้ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ คือประมาณ 0.01-0.05 ส่วนในล้านส่วน นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้บ้าง ซึ่งความสามารถในการละลายของโอโซนประมาณ 20 เท่าของออกซิเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการละลายของโอโซน และออกซิเจนในน้ำ

แก๊ส (%โดยน้ำหนักในอากาศ)	การละลายในน้ำที่อุณหภูมิ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0°ซ	10°ซ	20°ซ	30°ซ
<b>ออกซิเจน</b>				
100%	70.5	54.9	44.9	38.2
21%	14.8	11.5	9.4	8.0
<b>โอโซน</b>				
100%	1,374.3	1,114.9	789.0	499.6
21%	55.0	44.6	31.6	20.0

### 2.2.1 การละลายของแก๊สโอโซน

การละลายของแก๊สโอโซนขึ้นอยู่กับความดันย่อย (Partial pressure) ซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law) ดังสมการ 2.1

$$O_3 = K_s \cdot P_{O_3} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $O_3$  = ความเข้มข้นของโอโซน, มิลลิกรัม/ลิตร

$K_s$  = ค่าคงที่การละลายของโอโซน

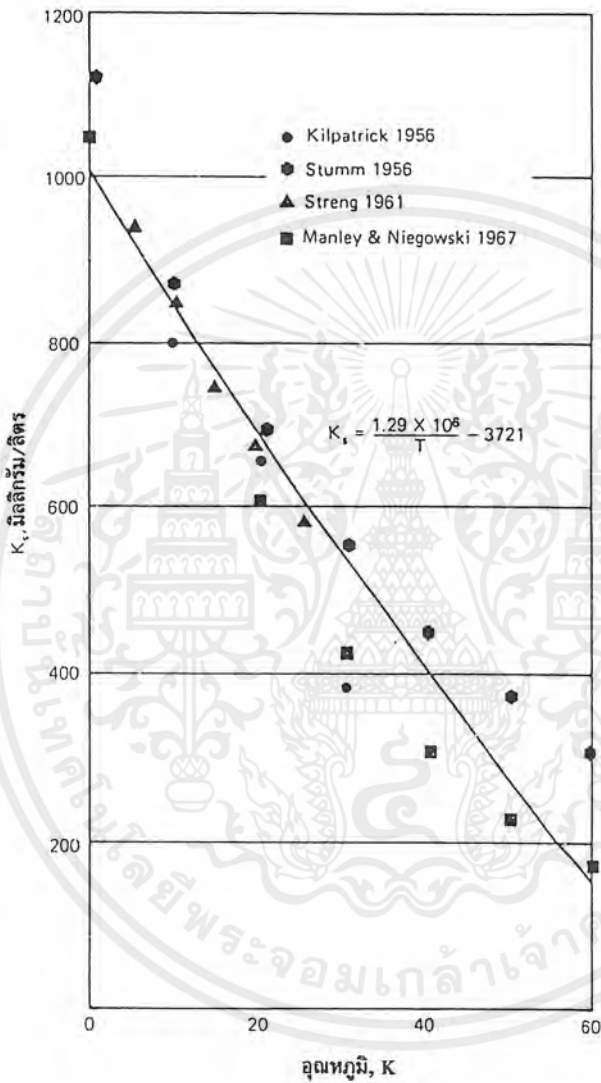
$P_{O_3}$  = ความดันย่อยของแก๊สโอโซน

โดยค่า  $K_s$  สามารถหาได้จากสมการของ Van't Hoff ดังนี้

$$K_s = \frac{1.29 \times 10^6}{T} - 3721 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $T$  = อุณหภูมิ, เคลวิน

จากสมการที่ (2.2) จะเห็นว่าค่าคงที่การละลายของโอโซนขึ้นกับอุณหภูมิ และ ได้มีผู้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การละลายกับอุณหภูมิไว้ดังรูปที่ 2.1 [3]



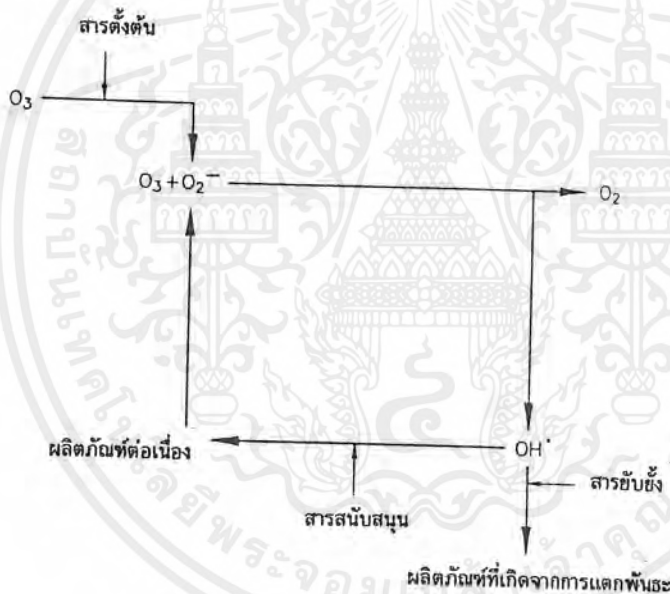
รูปที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่การละลายของแก๊สโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การสลายตัวของแก๊สโอโซน

ปรากฏการณ์การสลายตัวของโอโซนโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ประกอบด้วยขั้นตอนซึ่งรวมกันเป็นวัฏจักรอย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [4]

ปฏิกิริยาการสลายตัวเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารตั้งต้น (Initiating substance) เพื่อเปลี่ยนเป็นแอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide anion,  $O_2^-$ ) แล้วเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสารตัวกลางต่าง ๆ เช่น แรดิคัลไฮดรอกซิล ( $OH^\cdot$ ) จากนั้นจะทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นแอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์ หมุนเวียนอยู่ภายในวัฏจักรอีกครั้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโอโซนต่อไป ซึ่งปฏิกิริยาสุดท้ายจะได้ออกซิเจนเกิดขึ้น แล้วปล่อยออกนอกวัฏจักร



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สโอโซน

โดยทั่วไปแล้วสารตั้งต้นที่ทำให้โอโซนเกิดการสลายตัวมีหลายชนิด เช่น ไอออนไฮดรอกไซด์หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตยังสามารถทำให้เกิดสารเริ่มต้นได้ด้วย แต่ที่พบมากที่สุดคือ ไอออนไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อ pH มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น pH จึงมีบทบาทอย่างมากในวัฏจักรการสลายตัวของโอโซน

กล่าวคือ ที่ค่า pH สูง ๆ จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้ดีขึ้น ทำให้มีปริมาณของแรดดิคัลไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น

ปรากฏการณ์ภายนอกที่มีผลต่อวัฏจักรการสลายตัวของโอโซน มีอยู่ 2 ประการ คือ การสนับสนุนปฏิกิริยา (Promotion) และการยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibition) ทั้งนี้จะเติมสารสนับสนุน (Promoter หรือ Promoting agent) เข้าไปในวัฏจักรอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดเป็นแอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์ ( $O_2^-$ ) ดังรูปที่ 2.2 ในขณะที่ สารยับยั้ง (Inhibitor หรือ Inhibiting agent) จะเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาให้ช้าลง โดยการทำปฏิกิริยากับแรดดิคัลไฮดรอกซิล เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอื่นที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ ปกติแล้วโอโซนสามารถเป็นสารสนับสนุนได้ และวัฏจักรนี้ยังต้องการศักย์ไฟฟ้า เพื่อทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง

สารยับยั้งชนิดเอนคาท์เตอร์ (Encounter) เช่น คาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนต เป็นต้น จะทำปฏิกิริยากับแรดดิคัลไฮดรอกซิล ทำให้วัฏจักรของการสลายตัวของโอโซนเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุผลดังกล่าว การเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนตสามารถทำให้แก๊สโอโซนมีความเสถียรเพิ่มขึ้นเป็นระยะเวลานาน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการนำโอโซนไปประยุกต์ใช้ฆ่าเชื้อโรค เพราะจะทำให้จุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ สูญเสียความว่องไวในช่วงระยะเวลาดังกล่าว ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของแก๊สโอโซนบริสุทธิ์ [5]

### 2.3 การสังเคราะห์แก๊สโอโซน

การสังเคราะห์แก๊สโอโซนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรน่า หรือการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น แต่วิธีที่เป็นที่นิยมใช้มากในระดับอุตสาหกรรม คือ วิธี การใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรน่า เพราะสามารถสังเคราะห์โอโซนได้ปริมาณมากกว่าวิธีการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแก๊สไอโซนบริสุทธิ์<sup>a</sup>

จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)		-192.5 ± 0.4
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)		-111.9 ± 0.3
อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)		-12.1
ความดันวิกฤต (บรรยากาศ)		54.6
ปริมาตรวิกฤต (ลบ.ซม./โมล)		111
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นของของเหลว (กรัม/ลบ.ซม.)	ความดันไอของของเหลว (ทอร์)
-183	1.574	0.11
-180	1.566	0.21
-170	1.535	1.41
-160	1.504	6.73
-150	1.473	24.8
-140	1.442	74.2
-130	1.410	190
-120	1.378	427
-110	1.347	865
-100	1.316	1605
ความหนาแน่นของไอโซนของแข็งที่ 77.4 เคลวิน (กรัม/ลบ.ซม.)		1.728
ความหนืดของของเหลว (เซนติพอยต์)		
ที่ 77.6 เคลวิน		4.17
ที่ 90.2 เคลวิน		1.56
แรงตึงผิว (ไดนา-เซนติเมตร)		
ที่ 77.6 เคลวิน		43.8
ที่ 90.2 เคลวิน		38.4
พาราชอร์ ที่ 90.2 เคลวิน		75.7
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของของเหลว ที่ 90.2 เคลวิน		4.79
แรงระหว่างขั้ว (เดบาย)		0.555
ความไวต่อสารแม่เหล็ก (ซีจีเอส)		
แก๊ส		$0.002 \times 10^6$
ของเหลว		0.150
ความจุความร้อนของของเหลวจาก 90 ถึง 150 เคลวิน (เซนติพอยต์)		$0.425 + 0.0014(T-90)$
ความร้อนของการกลายเป็นไอ (กิโลแคลอรี/โมล)		
ที่ -111.9 องศาเซลเซียส		3410
ที่ -183 องศาเซลเซียส		3650

	ความร้อนของการเกิด (กิโลแคลอรี/โมล)	พลังงานอิสระของการเกิด (กิโลแคลอรี/โมล)
แก๊ส ที่ 298.15 เคลวิน	34.15	
ของเหลวที่ 90.15 เคลวิน	30.00	38.89

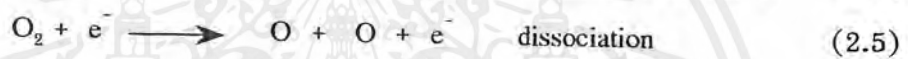
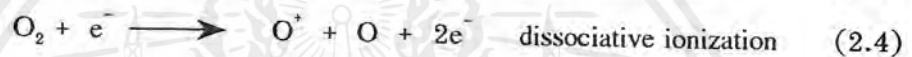
<sup>a</sup>  $M\gamma^{1/4}(D-d)$ , เมื่อ M = มวลโมเลกุล,  $\gamma$  = แรงตึงผิว, D = ความหนาแน่นของของเหลว และ d = ความหนาแน่นของไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 การสังเคราะห์แก๊สโอโซนโดยใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรนา

แก๊สโอโซนเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โคโรนาของแก๊สออกซิเจน โดยการป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าไปในสนามไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) ประมาณ 5 – 25 กิโลโวลต์ ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัว เนื่องจากความเครียดของสนามไฟฟ้าแรงสูงกลายเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยว และปล่อยอิเล็กตรอนออกมา แก๊สออกซิเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สโอโซน ตามขั้นตอนดังนี้ [5]

ขั้นที่ 1 การทำให้โมเลกุลออกซิเจนแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยว

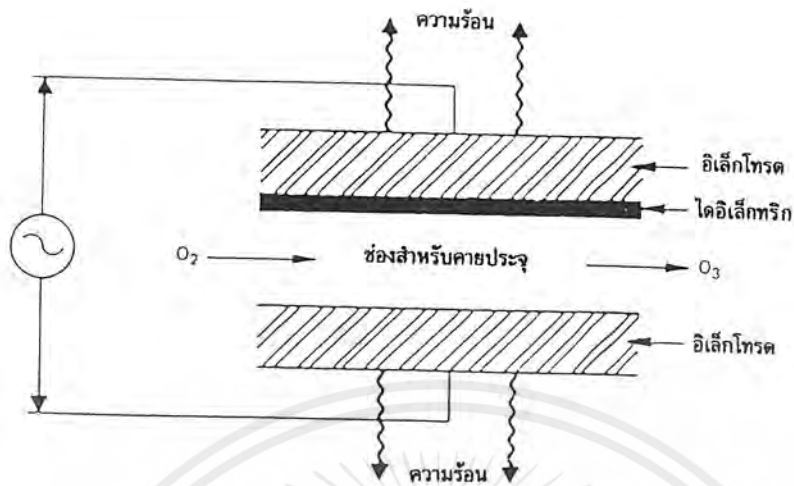


ขั้นที่ 2 การรวมตัวของอะตอมของออกซิเจนเป็นโมเลกุลโอโซน



โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซนโดยใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรนาแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีอิเล็กโทรด 1 คู่ วางขนานกันและห่างกันประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดเป็นช่องว่างของอากาศ และมีแผ่นไดอิเล็กทริก (หนาประมาณ 1-3 มิลลิเมตร) ติดอยู่ที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของอิเล็กโทรด

พลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ที่ถูกใช้เพื่อผลิตแก๊สโอโซน ความไม่มีประสิทธิภาพเบื้องต้นเกิดจากการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน แสง และเสียง เนื่องจากการสลายตัวของโอโซนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ เทคนิคในการกำจัดความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการปฏิบัติการของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน



รูปที่ 2.3 เครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซนโดยใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรนา

กลไกของการสังเคราะห์แก๊สโอโซน เป็นการกระตุ้นและการเร่งของอิเล็กตรอนภายในสนามศักย์ไฟฟ้าสูง กระแสไฟสลบจะเป็นสาเหตุให้อิเล็กตรอนถูกดูดโดยขั้วอิเล็กโทรดอันหนึ่ง จากนั้นถูกดูดโดยขั้วอิเล็กโทรดอีกอันหนึ่งสลบกัน เมื่ออิเล็กตรอนมีความเร็วมากพอก็สามารถจะแตกโมเลกุลออกซิเจนออกเป็นแรดิคัลอิสระของออกซิเจน จากนั้นอะตอมเหล่านี้จะรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนกลายเป็นโอโซน

ภายใต้สภาวะของการปฏิบัติการที่เหมาะสม (นั่นคือ การถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ และอัตราการไหลของแก๊สป้อนที่เหมาะสม) การสังเคราะห์โอโซนด้วยเครื่องสังเคราะห์แบบใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรนาสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบเครื่องสังเคราะห์ ดังนี้

$$V = k_1 \cdot p \cdot g \quad (2.8)$$

จะได้ปริมาณผลได้ของโอโซน  $Yield = k_2 \cdot f \cdot e \cdot V^2 / d \quad (2.9)$

เมื่อ  $V =$  ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน, โวลต์

$p =$  ความดันแก๊สในช่องอากาศ, ปอนต์ต่อตารางนิ้ว

$g =$  ความกว้างของช่องอากาศ, นิ้ว

$f =$  ความถี่ของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน, เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$e$  = ค่าไดอิเล็กทริก, ฟารัด/นิ้ว

$d$  = ความหนาของไดอิเล็กทริก, นิ้ว

$k_1, k_2$  = ค่าคงที่

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า ปัญหาของการออกแบบเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน คือ จะต้องพยายามทำให้ผนังไดอิเล็กทริกบางที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ ต้องสามารถทนแรงดันได้สูง ในขณะเดียวกันทั้งนี้หากต้องการให้ได้แก๊สไอโซนในปริมาณมาก ๆ จะต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นด้วย เพราะยิ่งแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงยิ่งทำให้ความสามารถในการสังเคราะห์แก๊สไอโซนสูงตามไปด้วย (พิจารณาจากสมการที่ 2.9 แก๊สไอโซนที่ผลิตได้จะแปรผันตามแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง) แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงเกินไป สารไดอิเล็กทริกที่ใช้จะเสียหายได้ง่ายขึ้น ในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้เพิ่มปริมาณแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ขึ้นได้ ได้แก่ การเพิ่มความถี่ของกระแสที่ใช้ การเพิ่มคุณภาพของสารไดอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น และการเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนออกจากเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน ซึ่งมีผลให้ปริมาณแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย

ในปัจจุบันเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนที่ใช้หลักการนี้ มีอยู่ 3 แบบด้วยกัน คือ แบบออโตโตเพลต(Otto plate) แบบท่อ(Tube) และแบบโลว์เธอร์เพลต(Lowther plate)

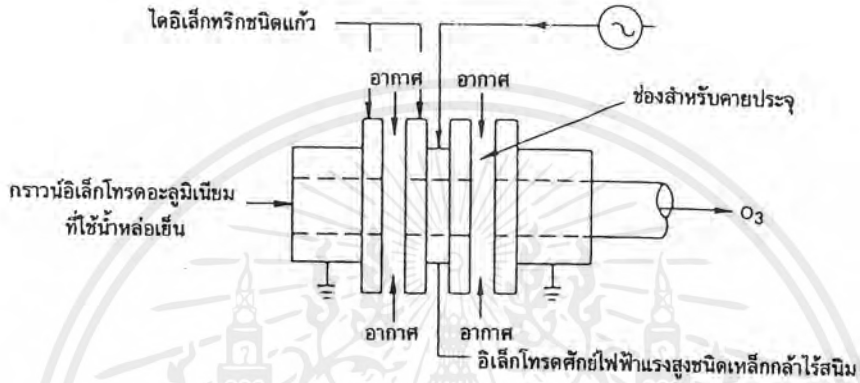
1) เครื่องสังเคราะห์แบบออโตโตเพลต ถูกออกแบบขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1905 ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพไม่ดีนัก แต่ก็ยังมีใช้อยู่ในบางส่วนของยุโรปตะวันตก เพราะใช้ขนาดของแรงดันต่ำ เครื่องสังเคราะห์แบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.4

2) เครื่องสังเคราะห์แบบท่อ จะประกอบด้วยจำนวนท่อหลาย ๆ ท่อรวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อิเล็กโทรดข้างนอกจะทำด้วยท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และการระบายความร้อนด้วยน้ำที่อยู่รอบ ๆ ท่อ ส่วนของท่อแก้วที่อยู่ตรงกลาง จะถูกเคลือบผิวด้วยตัวนำไฟฟ้า ไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกป้อนเข้าระหว่างตัวนำที่เคลือบอยู่ด้านบนนอกหลอดแก้วกับท่อเหล็กด้านนอก อากาศหรือแก๊สออกซิเจนจะถูกส่งผ่านระหว่างช่องว่างนั้น การสังเคราะห์แก๊สไอโซนโดยวิธีนี้สามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ จึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

3) เครื่องสังเคราะห์แบบโลว์เธอร์เพลต เป็นแบบใหม่ที่ถูกปรับปรุงขึ้น เครื่องสังเคราะห์แบบนี้จะใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งต่างจากสองแบบแรกที่ใช้การระบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนด้วยน้ำ อีเล็กโตรดถูกเคลือบด้วยเซรามิกส์หรือยางซิลิโคน โดยเคลือบทั้งด้านนอกและด้านในท่อ ซึ่งจะทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพสูง เครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซนแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.6

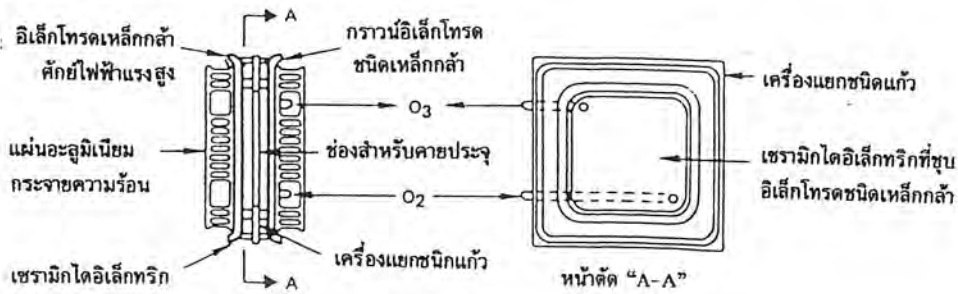


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซนแบบออตโตเพลต



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซนแบบท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซนแบบโลว์เพอร์เชลต์

### 2.3.2 การสังเคราะห์แก๊สโอโซนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

แก๊สโอโซนจะถูกสังเคราะห์โดยใช้หลักการทางเคมีของแสง พลังงานโฟตอนของแสงที่ใช้ หาได้จากสมการที่ (2.10)

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \quad (2.10)$$

เมื่อ  $E$  = พลังงานโฟตอน, เอิร์ก

$h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ =  $6.63 \times 10^{-27}$  เอิร์ก·วินาที

$c$  = ค่าความเร็วของแสง =  $3 \times 10^{10}$  เซนติเมตร/วินาที

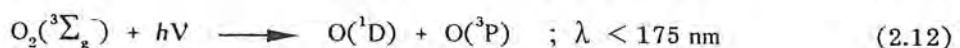
$\nu$  = ความถี่ของแสง, เฮิรตซ์

$\lambda$  = ความยาวคลื่น, นาโนเมตร

ขั้นตอนในการสังเคราะห์แก๊สโอโซนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

#### 1) การสลายโมเลกุลของออกซิเจน

การสลายโมเลกุลของออกซิเจนโดยใช้พลังงานแสงจะเกิดได้หลายรูปแบบ โดยจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้ ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 2) การเกิดโมเลกุลของโอโซน

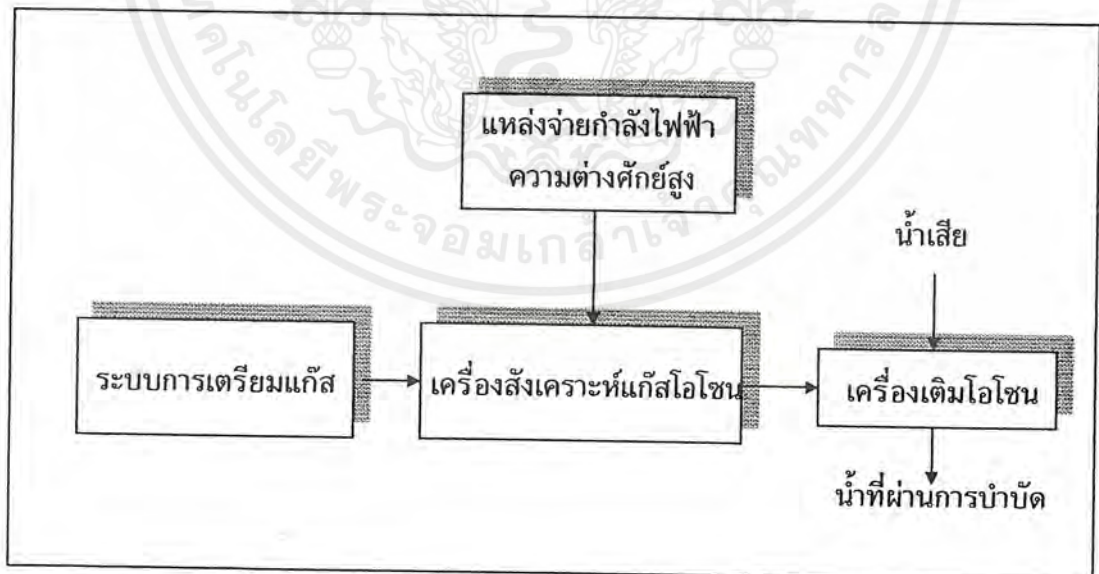
ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังสมการ



โดยทั่วไป การสลายโมเลกุลของออกซิเจนจะเกิดดังสมการที่ (2.13) และ (2.13a) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นประมาณ 185 นาโนเมตร [5]

## 2.4 อุปกรณ์และระบบการเติมโอโซน

ระบบการเติมโอโซนประกอบด้วย 4 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบเตรียมแก๊ส แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง เครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน และเครื่องเติมโอโซน (Contactor) ซึ่งจะรวมหน่วยบำบัดแก๊สที่ปล่อยออกด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญในระบบการเติมโอโซน แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



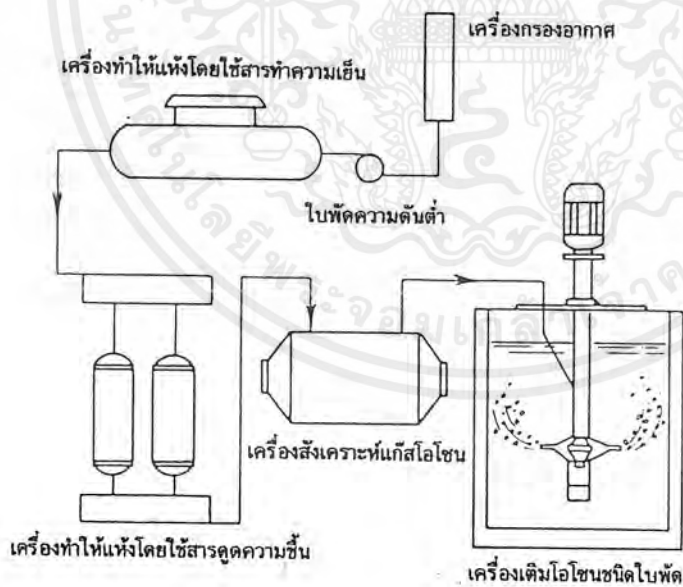
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบที่สำคัญในระบบการเติมโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 ระบบการเตรียมแก๊ส

แก๊สที่เข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์แก๊สไอโซน (ซึ่งได้แก่ ออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศอัด แต่ที่นิยมใช้ คือ อากาศอัด) จำเป็นต้องผ่านเข้าสู่ระบบการเตรียมแก๊ส เพื่อกำจัดความชื้น จะทำให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น เพราะความชื้นในแก๊สจะเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สไอโซน ถ้าใช้อากาศ ความชื้นในอากาศจะรวมตัวกับไนโตรเจนในสนามไฟฟ้าของสวดโคโรนา เกิดเป็นกรดไนตริกซึ่งจะกัดกร่อนอุปกรณ์ จึงจำเป็นที่จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้อากาศชื้นเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์แก๊สไอโซน

โดยปกติแล้ว ภายในระบบการเตรียมแก๊สประกอบด้วยเครื่องทำให้แห้งด้วยสารทำความเย็น (Refrigerant drier) และเครื่องทำให้แห้งด้วยการดูดความชื้น (Desiccant drier) เพื่อลดจุดน้ำค้างของแก๊สให้ต่ำที่สุด คือ ประมาณ  $-40$  องศาเซลเซียส ซึ่ง ณ อุณหภูมินี้จะทำให้แก๊สมีความชื้นน้อยที่สุด โดยจะใช้ไฮโกรมิเตอร์เป็นเครื่องตรวจสอบความชื้น รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของระบบการเตรียมแก๊ส



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของระบบเตรียมแก๊ส

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการเปลี่ยน (Conversion) สามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างมาก ด้วยการใส่แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโอโซน (% โดยน้ำหนัก) เมื่อใช้อากาศและออกซิเจนเป็นแก๊สป้อน

ชนิดของเครื่องสังเคราะห์โอโซน	อากาศ	ออกซิเจน
เครื่องผลิตความถี่ปานกลางและต่ำ ที่ถูกควบคุมด้วยความต่างศักย์	1.0-1.5	2.0-3.0
เครื่องผลิตความถี่สูงที่ถูกควบคุมความถี่	2.5-3.0	5.0-10.0

#### 2.4.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) จะขึ้นอยู่กับผู้ผลิตการใช้กำลังไฟฟ้าและความจุในการสังเคราะห์แก๊สโอโซนเป็นสัดส่วนกับศักย์ไฟฟ้าและความถี่วิธีที่ใช้ในการควบคุมเอาต์พุตของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน คือ การเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าหรือการเปลี่ยนความถี่ อุปกรณ์ทางการค้าจะมีรูปแบบการใช้กำลังไฟฟ้าอยู่ 3 แบบด้วยกัน ดังนี้

- 1) ความถี่ต่ำ (50-60 เฮิรตซ์) คงที่, เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า
- 2) ความถี่ปานกลาง (600 เฮิรตซ์) คงที่, เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า
- 3) ศักย์ไฟฟ้าคงที่, เปลี่ยนความถี่

รูปแบบที่พบบ่อยมากที่สุดเป็นแบบความถี่ต่ำคงที่ เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า สำหรับระบบใหญ่ที่ต้องการการผลิตโอโซนเป็นจำนวนมาก แต่ไม่ต้องการเพิ่มขนาดของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน จะใช้แบบความถี่ 600 เฮิรตซ์คงที่ ซึ่งจะเพิ่มการผลิตโอโซนได้มากเป็น 2 เท่า

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการใช้กำลังไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ

#### 2.4.3 เครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน

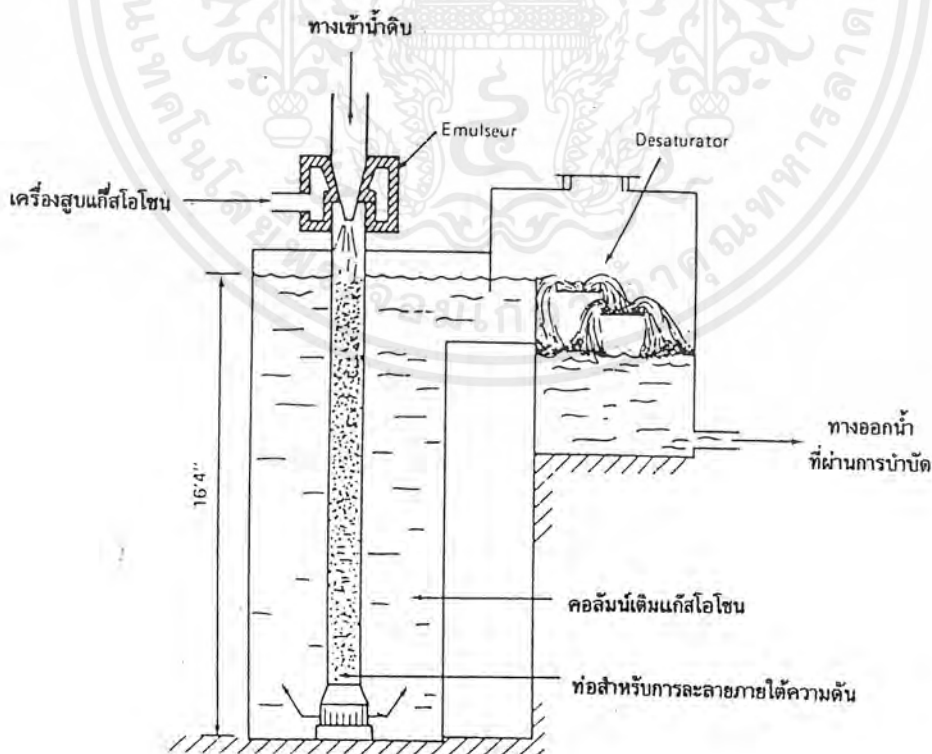
เครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน (Ozone synthesizer) จะทำหน้าที่สังเคราะห์แก๊สโอโซนจากอากาศหรือจากออกซิเจน ที่ป้อนเข้าหน่วยเตรียมแก๊ส โดยทั่วไปจะนิยมใช้เครื่องสังเคราะห์แบบใช้สนามไฟฟ้าของลวดโคโรนาตั้งได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบรูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน

ชนิด	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	แฟคเตอร์กำลัง
ความถี่ต่ำ	60	10-20	$\geq 0.4$
ความถี่ปานกลาง	700-800	8-14	$\geq 0.8$
ความถี่สูง	2,000-3,000	8-10	1.0

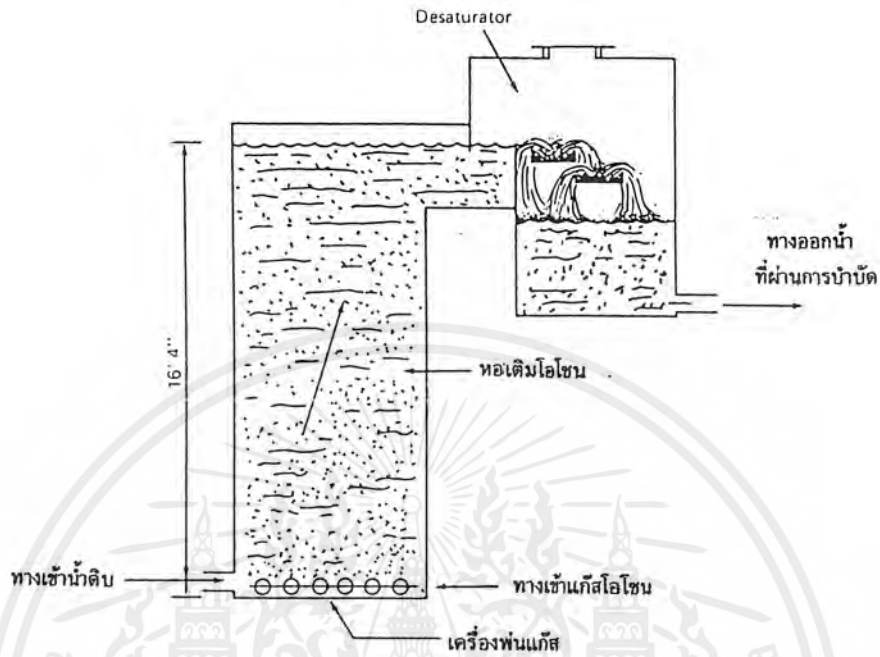
#### 2.4.4 เครื่องเติมโอโซนและหน่วยกำจัดแก๊สที่ปล่อยออก

ภายหลังจากโอโซนถูกสังเคราะห์แล้ว จะถูกนำไปผสมกับน้ำที่ต้องการบำบัดในอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องเติมโอโซน (Ozone contactor) อุปกรณ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อ ให้โอโซนสัมผัสและละลายในน้ำให้ได้มากที่สุด โดยค่าใช้จ่ายด้านกำลังไฟฟ้าต้องต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ได้มีการออกแบบเครื่องเติมโอโซนไว้มากมาย ตัวอย่างการออกแบบเป็นดังรูปที่ 2.9-2.12

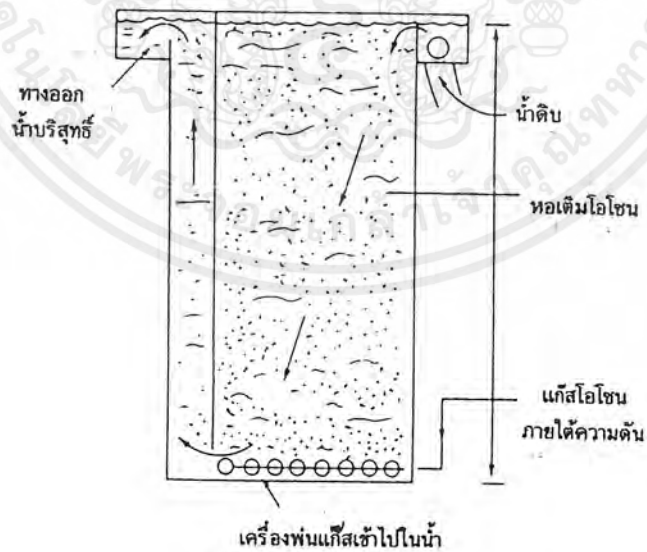


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สโอโซนแบบออกโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

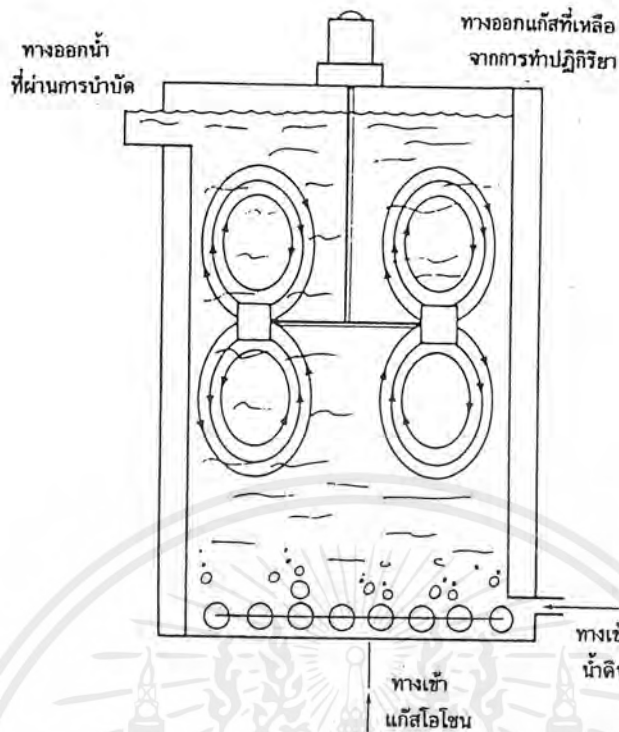


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สโอโซนแบบไหลบรรจุกัน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สโอโซนแบบไหลส่วนทางกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเครื่องเติมแก๊สโอโซนแบบถังปั่นกววน

ปัญหาประการหนึ่งของระบบการเติมโอโซน คือ การกำจัดแก๊สโอโซนที่เหลือจากปฏิกิริยา (Off-gas) ภายในเครื่องเติมโอโซน เพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สโอโซนที่เหลือทำปฏิกิริยากับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ และเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เนื่องจากโอโซนในเครื่องเติมโอโซนจะถูกใช้ทำปฏิกิริยาประมาณ 90-100 เปอร์เซ็นต์ของโอโซนที่ใส่เข้าไป เพราะฉะนั้นอากาศที่ออกมาจากเครื่องเติมโอโซนจะมีปริมาณโอโซนสูงถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของอากาศที่ออกมา ซึ่งจะไม่ถูกใช้ทำปฏิกิริยา และอยู่ในระดับอันตราย จึงต้องมีการกำจัดแก๊สโอโซนที่เหลือความเข้มข้นประมาณ 0.1 ส่วนในล้านส่วน ( $1 \times 10^{-5}$  เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของอากาศที่ออกมา) โดยมีวิธีในการกำจัด ดังนี้

#### 1) การนำแก๊สโอโซนกลับมาฉีดใหม่ (Reinjection)

โครงสร้างของเครื่องเติมโอโซนจะประกอบด้วยส่วนที่ให้อโอโซนสัมผัสกับน้ำ 2 ส่วน โดยแก๊สโอโซนที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่ (Fresh ozone) จะถูกป้อนเข้าเครื่องในส่วนล่าง หลังจากนั้นโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา จะถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ โดยจะถูกปั๊มให้เข้าเครื่องในส่วนบน ซึ่งอากาศที่ออกมาจากเครื่องเติมโอโซนในส่วนที่ 2 นี้ จะมีปริมาณโอโซนที่เหลือ

จากการทำปฏิกิริยา 10 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งยังมีปริมาณสูงมาก ดังนั้นเพื่อให้ระบบนี้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นควรจะมีการออกแบบระบบนี้ใช้ร่วมกับระบบอื่น

2) การให้ความร้อนเพื่อการสลายแก๊สไอโซนอัติโนมติ (Heating to auto-decomposition)

การกำจัดแก๊สไอโซนด้วยวิธีนี้จะต้องออกแบบให้มีส่วนที่สามารถให้ความร้อนมากพอกับแก๊สไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เพราะความร้อนจะทำให้แก๊สไอโซนสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียคือต้องใช้พลังงานความร้อนสูงมากเพื่อให้ได้อุณหภูมิสูง ๆ แก๊สไอโซนจึงเกิดการสลายตัว โดยปกติแล้วอุณหภูมิจะสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส

3) การรีดักชันทางเคมีด้วยสารรีดิวซ์ (Chemical reduction with a reducing agent)

การเกิดรีดักชันทางเคมี เป็นอีกวิธีหนึ่งในการกำจัดแก๊สไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยการผ่านอากาศหรือแก๊สไอโซนที่ออกจากเครื่องเติมไอโซนแบบไหลสวนทางกับสารรีดิวซ์ในเครื่องสครับเบอร์ (Scrubber) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเครื่องกำจัดควันในโรงงานอุตสาหกรรม สิ่งสำคัญของวิธีนี้ คือ การเลือกสารรีดิวซ์จะต้องมีราคาไม่แพง และต้องไม่ถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนในอากาศ

การเกิดปฏิกิริยารีดักชันดังกล่าวสามารถทำให้เร็วขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะออกไซด์ เช่น เหล็กออกไซด์ โดยปฏิกิริยาจะเกิดที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้การกำจัดแก๊สไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเป็นไปได้เร็วขึ้น

4) การทำให้เจือจาง (Dilution)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการกำจัดแก๊สไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยจะต้องสร้างปล่องไฟ (Stack) และติดตั้งพัดลม เพื่อให้เกิดการผสมของอากาศสะอาดและอากาศที่มีแก๊สไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาอยู่ ทำให้มีปริมาณความเข้มข้นเจือจางลง ถ้าความเร็วของอากาศที่ถูกผสมมีค่าสูงพอก็จะทำให้การเจือจางเกิดได้ดีขึ้น การออกแบบปล่องไฟที่ดีควรมีความสูงมากพอสมควร เพื่อที่จะได้มีปริมาตรมาก ๆ และความดันที่เกิดขึ้นภายในจะต้องมีค่าต่ำ

## 2.5 การประยุกต์ใช้งานแก๊สโอโซน

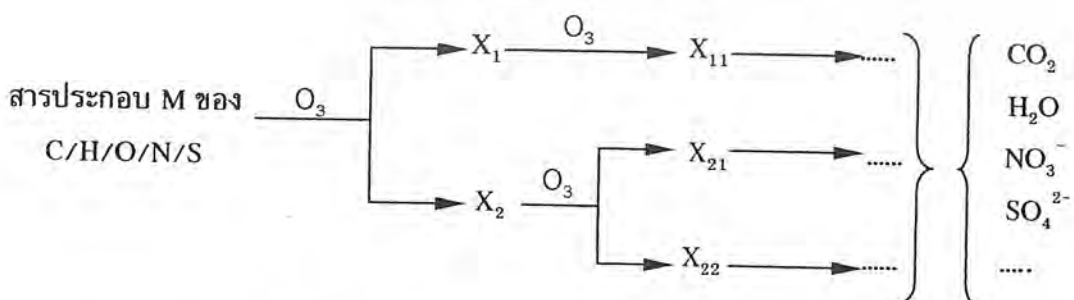
เนื่องจากแก๊สโอโซนมีสมบัติสำคัญ คือ เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก และมีค่าศักย์ไฟฟ้าของการรีดักชันเท่ากับ 2.07 โวลต์ จึงสามารถออกซิไดซ์หรือเติมออกซิเจนให้กับสารเคมีหลายชนิด ปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดในระบบของน้ำ ในปัจจุบันแก๊สโอโซนถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านต่าง ๆ เช่น

### 2.5.1 การใช้แก๊สโอโซนในการบำบัดน้ำ

การนำแก๊สโอโซนไปใช้ในการบำบัดน้ำมี 2 แบบ คือ

- 1) การบำบัดน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ปกติน้ำดังกล่าวจะมีสารเจือปนอยู่ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย เหล็ก และสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนแต่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม
- 2) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่ม เช่น น้ำดื่ม น้ำใช้ในกระบวนการผลิต น้ำใช้ในหม้อน้ำ น้ำหล่อเย็น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการผลิต จึงจำเป็นต้องทำการบำบัดให้ได้มาตรฐานก่อนใช้งาน

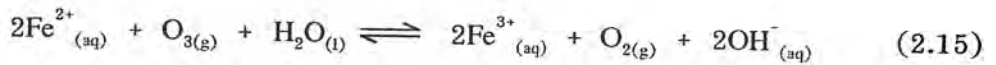
ในการทำปฏิกิริยาของแก๊สโอโซนกับสารอินทรีย์ในน้ำ เริ่มต้นโดยโมเลกุลแม่ (Parent molecule) เช่น สารประกอบไนเตรดและสารประกอบซัลเฟต ที่เจือปนอยู่ในน้ำจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สโอโซน ทำให้เกิดโมเลกุลลูก (Daughter molecule) ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



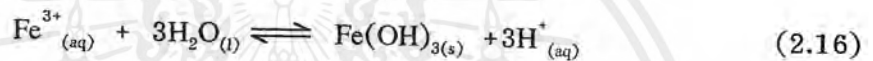
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สโอโซนกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย

### 2.5.1.1 การกำจัดเหล็กและแมงกานีส

ไอออน(II)ไอออนที่สามารถละลายน้ำได้ จะถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วด้วยแก๊สโอโซนกลายเป็นไอออน(III)ไอออนที่ไม่ละลายน้ำ ในทางทฤษฎีแก๊สโอโซนประมาณ 0.4 มิลลิกรัม จะใช้ออกซิไดซ์ไอออน(II)ไอออน 1 มิลลิกรัม ดังสมการที่ (2.15)

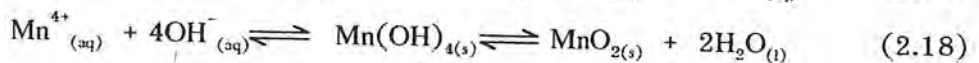
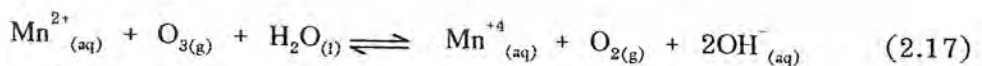


จากนั้นไอออน(III)ไอออน จะตกตะกอนอยู่ในรูปไอออน(III)ไฮดรอกไซด์ และสามารถกำจัดออกจากน้ำได้ ดังสมการที่ (2.16)



แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วแก๊สโอโซนจะมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เหล็ก แต่เหล็กสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนได้ เมื่อมีสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำในธรรมชาติ (Humic materials) ในสภาวะที่เหมาะสม และภายใต้สภาวะนี้ประสิทธิภาพของการออกซิเดชันด้วยโอโซน ถูกทำให้ลดลงได้

แมงกานีส(II)ไอออน ( $\text{Mn}^{2+}$ ) ที่ละลายน้ำได้ สามารถถูกออกซิไดซ์เป็นแมงกานีส(IV)ไอออน ( $\text{Mn}^{4+}$ ) ด้วยแก๊สโอโซน โดยใช้ปริมาณในทางทฤษฎี คือ ประมาณ 0.9 มิลลิกรัมของโอโซนต่อมิลลิกรัมของแมงกานีส(II)ไอออน จากนั้นแมงกานีส(IV)ไอออนสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแมงกานีส(IV)ไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ( $\text{Mn}(\text{OH})_4$ ) และแมงกานีส(IV)ออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ดังสมการที่ (2.17) และ (2.18)



ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมงกานีสจะถูกควบคุมด้วย pH ซึ่งอัตราการออกซิเดชันจะลดลงเมื่อ pH ต่ำลง แต่อัตราการออกซิเดชันโดยใช้โอโซนที่ pH มีค่าน้อยเกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับสารออกซิเดนต์อื่น

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการใช้แก๊สไอโซน ออกซิไดซ์แมงกานีส คือ ปริมาณแก๊สไอโซนจะถูกกระทบเมื่อมีสารอินทรีย์อยู่ในน้ำเป็นปริมาณมาก โดยแมงกานีสจะไม่ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารเชิงซ้อน เพราะสารอินทรีย์จะทำให้ไอโซนเบี่ยงเบนไปจากปฏิกิริยาที่ต้องการ

### 2.5.1.2 การกำจัดสี

สีที่เกิดขึ้นในน้ำดื่มโดยปกติแล้ว จะเกี่ยวข้องกับการเกิดสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำในธรรมชาติ และส่วนมากมีสาเหตุมาจากรูปแบบพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ประกอบด้วยพันธะคู่และพันธะเดี่ยวสลับกัน (เช่น  $-C=C-C=C-$ ) หรือเกิดกลุ่มสีที่ประกอบด้วยสารประกอบที่มีหมู่  $-OH$  และ  $-NH_2$  ซึ่งเรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophores)

แก๊สไอโซนมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพันธะคู่คาร์บอน-คาร์บอน และกลุ่มโครโมฟอร์ิก ( $-OH$  และ  $-NH_2$ ) โดยทั่วไปแล้วการกำจัดสีด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเป็นการทำลายกลุ่มเหล่านี้ อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่าสารประกอบอินทรีย์จะต้องถูกกำจัดทั้งหมด แต่จะกำจัดกลุ่มที่ทำให้เกิดสีเริ่มต้น ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาจะได้สารพวกคีโตน อัลดีไฮด์ และกรด องค์ประกอบที่แท้จริงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารประกอบที่ทำให้เกิดสี ปริมาณของไอโซนที่ใช้ เวลาในการทำปฏิกิริยา และสภาวะที่มีผลอื่น ๆ

### 2.5.1.3 การกำจัดรสและกลิ่น

รสและกลิ่นที่พบในการบำบัดน้ำจะเกี่ยวข้องกับปริมาณของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อาจจะไวต่อการออกซิไดซ์ด้วยไอโซน ในความเป็นจริงนั้นพบว่าแก๊สไอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการควบคุมรสของสารอินทรีย์ และสารประกอบที่มีกลิ่น ประสิทธิภาพดังกล่าวนี้สามารถรวมถึงการกำจัดรสและกลิ่นของสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดโดยธรรมชาติ เช่น เห็ดรา และพืชที่เน่าเปื่อย รวมทั้งสารประกอบในอุตสาหกรรม เช่น ฟีนอล เป็นต้น แม้ว่าประสิทธิภาพโดยทั่วไปของไอโซนจะสามารถควบคุมรสและกลิ่นได้ แต่ความสามารถของไอโซนไม่จำเป็นต้องใช้ได้ทั่วไป เพราะความว่องไวของโมเลกุลไอโซนจะขึ้นกับลักษณะของสารประกอบที่ถูกออกซิไดซ์

โอโซนสามารถเป็นสารออกซิแดนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับกำจัด  
รสและกลิ่นมากมายที่เกิดจากแพลงตอน ปกติแล้วสามารถกำจัดกลิ่นควาได้อย่างสมบูรณ์ แต่  
ไม่สามารถกำจัดรสฝาดบางชนิดได้ ขณะที่กลิ่นคล้ายผลไม้ถูกผลิตขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา  
ออกซิเดชันของส่วนประกอบบางชนิดได้ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรสและกลิ่น การเกิดกลิ่นคล้ายผล  
ไม้เนื้อนุ่มโดยปกติจะเกี่ยวข้องกับกาเกิดอัลดีไฮด์

#### 2.5.1.4 เพิ่มการรวมตัวของตะกอน

การออกซิเดชันสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติด้วยโอโซน เช่น  
องค์ประกอบอินทรีย์ที่ละลายในน้ำตามธรรมชาติ สามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการรวมตัว  
ของตะกอน เมื่อใช้ปริมาณโอโซนต่ำ ๆ การออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation)  
สามารถเกิดขึ้นได้ เป็นผลให้เกิดการปรับปรุงองค์ประกอบโครงสร้างที่แน่นของสารอินทรีย์  
โดยไม่มีการแตกโครงสร้างโมเลกุล สารอินทรีย์จำนวนมากที่ถูกออกซิไดซ์บางส่วนเหล่านี้พบ  
ว่า สามารถทำอันตรกิริยาต่อกันและมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกัน การประยุกต์ใช้โอโซนที่ความ  
เข้มข้นต่ำอาจจะปรับปรุงการสะเทิน (Neutralization) และการรวมกันเป็นก้อนของคอลลอยด์  
(Agglomeration)

#### ข้อดีของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ

- 1) โอโซนสามารถออกซิไดซ์สารประกอบต่าง ๆ ในน้ำ ทั้งสารอินทรีย์และสาร  
อนินทรีย์ เช่น โลหะหนักที่เจือปนในน้ำ ได้อย่างรวดเร็ว
- 2) โอโซนเป็นสารออกซิแดนต์ที่แรงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาล้น สามารถ  
ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ภายในเวลาเพียง 2-3 วินาที
- 3) ใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาต่ำ โดยทั่วไปโอโซนจะละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิ  
ต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิดโอโซน จึงเกิดได้ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ไม่  
จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้นในการทำให้เกิดปฏิกิริยา
- 4) โอโซนสามารถสลายตัวได้ง่าย จึงไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างในระบบ
- 5) สามารถแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำได้ ด้วยการทำให้ผิวน้ำมีคุณสมบัติ  
เป็นกลาง ทำให้โมเลกุลของสารแขวนลอยรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น จึงสามารถแยก  
ออกจากน้ำได้ง่าย

6) ควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ (Algae) โดยการออกซิไดซ์อาหารของพืชน้ำ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอาหารและหยุดการเจริญเติบโต หลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะได้แก๊สออกซิเจนเกิดขึ้น

7) กำจัดสี รส และกลิ่นของน้ำได้

### 2.5.2 การสังเคราะห์สารเคมีในอุตสาหกรรม

การใช้แก๊สไอโซนเพื่อสังเคราะห์สารเคมีในอุตสาหกรรมที่สำคัญ ได้แก่ การสังเคราะห์กรดอะซีลาอิก (Azelaic acid) โดยปฏิกิริยาการเกิดไอโซนของกรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดโอเลอิกส่วนใหญ่มาจากไขมันของสัตว์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของโรงงานบรรจุเนื้อสัตว์และโรงงานผลิตกระดาษ กระบวนการเริ่มจากการละลายกรดโอเลอิก (ประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนัก) ด้วยกรดเพลาโกนิก (Pelargonic acid) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง ภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วย 2 เปอร์เซนต์ของไอโซนในออกซิเจน ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้เวลานานมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะถูกส่งไปแยกกรดอะซีลาอิกและกรดเพลาโกนิกออกจากกัน ด้วยกระบวนการกลั่นแบบสูญญากาศ กรดเพลาโกนิกที่แยกได้ จะนำกลับมาใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการใหม่

กรดอะซีลาอิกเป็นสารเริ่มต้นที่สำคัญมากในกระบวนการผลิตไนลอน นอกจากนี้ กรดอะซีลาอิกยังสามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) เกิดเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เพื่อเกิดเป็นสารประกอบไวนิล (Vinyl compounds) หรือใช้สำหรับผลิตน้ำมันหล่อลื่น

## บทที่ 3

### การเกิดออกซิเดชันทางเคมี

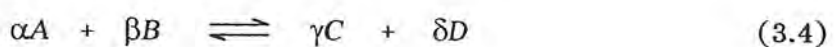
การเกิดออกซิเดชันทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ความสมดุลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ ค่า pH และความรุนแรงของสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยหลักการออกซิเดชันทางเคมีนี้ ดังแสดงด้วยสมการเคมีข้างล่าง



การศึกษาความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ต้องอาศัยสมการของเนินสต์ (Nernst equation) และค่าการละลาย (Solubility) ของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะแต่ละชนิด นอกจากนั้นอาจตรวจสอบดูได้ว่าโลหะ ไอออน หรือสารประกอบที่เกิดจากการออกซิเดชันทางเคมีจะมีเสถียรภาพในสภาวะใด จากแผนภูมิของความต่างศักย์-pH (Potential - pH diagram) บางที่เรียกแผนภูมินี้ว่าแผนภูมิปูแบ็กซ์ (Pourbaix diagram) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไป

#### 3.1 แอคติวิตีและสัมประสิทธิ์แอคติวิตี

พิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป



โดยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิก พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปทางขวา นั่นคือ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{a_C^\gamma a_D^\delta}{a_A^\alpha a_B^\beta} \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $\Delta G$  = พลังงานอิสระ, กิโลจูล/โมล  
 $R$  = ค่าคงตัวของแก๊ส, แคลอรี/โมล-เคลวิน  
 $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน  
 $a_i$  = แอคติวิตีของสารชนิด  $i$   
 $\alpha, \beta, \gamma,$  และ  $\delta$  = สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารชนิด A, B, C, และ D ตามลำดับ

ที่ภาวะสมดุล  $\Delta G$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (3.5) จะลดรูปเหลือ

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{eq} \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$K_{eq} = \frac{a_C^\gamma a_D^\delta}{a_A^\alpha a_B^\beta} \quad (3.7)$$

ในสมการที่ (3.5) สำหรับแก๊สอุดมคติที่อยู่ในสภาวะมาตรฐานมีความดันไอย่อย ( $P^0$ ) เท่ากับ 1 บาร์ ค่าแอคติวิตีจะเท่ากับ  $P/P^0$  สำหรับสารประกอบของสารละลายอุดมคติที่สภาวะมาตรฐานความเข้มข้น ( $C^0$ ) เท่ากับ 1 โมลต่อลิตร ค่าแอคติวิตีจะเท่ากับ  $C/C^0$  สำหรับของแข็งและของเหลวบริสุทธิ์นั้นจะอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นค่าแอคติวิตีจะเท่ากับ 1 และสำหรับตัวทำละลายในสารละลายอุดมคติ จะถูกสมมติว่าเป็นของเหลวบริสุทธิ์ที่มีค่าแอคติวิตีเท่ากับ 1 เช่นกัน

ในการใช้สมการที่ (3.5), (3.6), และ (3.7) สำหรับการคำนวณในกรณีที่สารละลายไม่ใช่สารละลายอุดมคติหรือแก๊สผสมที่ไม่เป็นอุดมคติจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอคติวิตี (Activity coefficient,  $\gamma$ ) เพื่อคำนวณค่าแอคติวิตีตามสมการที่ (3.8)

$$a = \gamma C/C^0 \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\gamma =$  ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี

$C =$  ความเข้มข้น, โมล/ลิตร

$C^0 =$  ความเข้มข้นที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 1 โมล/ลิตร

เนื่องจาก  $C^0 = 1$  โมลต่อลิตร ทำให้ค่าแอกติวิตีจะมีค่าเท่ากับ  $\gamma C$  แต่ต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าแอกติวิตีจะต้องไม่มีหน่วยไม่ว่าจะคำนวณโดยใช้ความเข้มข้นหรือความดันย่อยก็ตาม

### 3.2 สมการของเนินสต์

จากงานทางไฟฟ้าที่ทำโดยเซลล์กัลวานิก มีค่าเท่ากับความต่างศักย์คูณด้วยประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทที่ขั้วไฟฟ้าใด ๆ สำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน  $n$  โมล ประจุที่ถ่ายเทก็คือ  $nF$  ดังนั้น งานทางไฟฟ้าในหน่วยจูลน์เท่ากับ  $nFE$  ปริมาณงานสูงสุดที่ทำโดยเซลล์กัลวานิก คือค่าของ  $nFE$  ภายใต้เงื่อนไขที่กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้าผันกลับได้ เนื่องจากงานทางไฟฟ้าเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งของงานนอกเหนือจากงานของการขยายหรือหดตัวที่มีในเซลล์กัลวานิกแบบดั้งเดิม ตามหลักของพลังงานอิสระอาจกล่าวได้ว่า

$$\Delta G = -nFE \quad (3.9)$$

เมื่อ  $E =$  ความต่างศักย์, โวลต์

$n =$  จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในครึ่งปฏิกิริยา

$F =$  ค่าคงที่ของฟาราเดย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96,485 คูลอมป์/โมล

ดังนั้นจากสมการที่ (3.5) จะได้

$$-nFE = \Delta G^\circ + RT \ln K_{eq} \quad (3.10)$$

ที่สภาวะมาตรฐาน

$$E^\circ = -\Delta G^\circ / nF \quad (3.11)$$

แทนค่ากลับลงในสมการที่ (3.10) จะได้

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln K_{eq} \quad (3.12)$$

ซึ่งเรียกสมการที่ (3.12) ว่าสมการของเนินสต์

เมื่อรวมค่าคงที่เข้าด้วยกันและเปลี่ยนลอการิทึมธรรมชาติเป็นลอการิทึมฐานสิบ สมการที่ (3.12) สำหรับความต่างศักย์ (ในหน่วยโวลต์) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กลายเป็น

$$E = E^0 - \frac{0.0592}{n} \log K_{eq} \quad (3.13)$$

โดยค่าความต่างศักย์ที่สภาวะมาตรฐาน ( $E^0$ ) สามารถหาได้จากตารางในภาคผนวก ก

### 3.3 แผนภูมิความต่างศักย์ - pH

นักเคมีจะสนใจปฏิกิริยาที่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 0-14 ส่วนนักชีวเคมีจะสนใจปฏิกิริยาที่มีค่า pH ใกล้เคียงกับ 7 ซึ่งสามารถหาข้อมูลได้จากตารางศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ แผนภูมิลาทิเมอร์ (Latimer diagram) หรือแผนภูมิพลังงานอิสระ-ออกซิเดชัน (Free energy-oxidation state diagram) สำหรับระบบที่มีค่า pH ต่างออกไป สมการของเนินสต์สามารถนำไปคำนวณหาความต่างศักย์หรือพลังงานอิสระได้ พิจารณากระบวนการครึ่งเซลล์ทั่วไปดังสมการ



สามารถคำนวณหาความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_B}{a_A a_H^+{}^m} \quad (3.15)$$

เมื่อค่าแอกติวิตีของ A และ B มีค่าเท่ากัน จะได้

$$E = E^0 - 2.303 \frac{mRT}{nF} pH \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

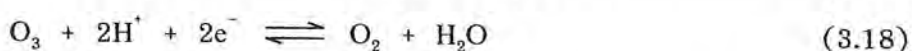
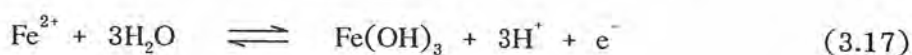
ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะถูกพิจารณาว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ pH ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ  $-59.2(m/n)$  มิลลิโวลต์ต่อหน่วย pH ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตารางค่า  $E^0$  และ  $\Delta G^0$  แสดงในตาราง ก.1 และ ก.2 ของภาคผนวก ก ตามลำดับ ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบเหล็ก-น้ำ โคบอลต์-น้ำ และนิกเกิล-น้ำ แสดงในตารางที่ 3.1-3.3 และรูปที่ 3.1-3.3 ส่วนระบบโลหะอื่น ๆ แสดงในภาคผนวก ก ตาราง ก.3

เส้นตรงที่ลากแต่ละเส้น จะแสดงถึงเงื่อนไขของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกของสารประกอบแต่ละชนิด ส่วนเส้นประในตำแหน่งบน กลาง และล่าง จะแสดงถึงขีดจำกัดการละลายทางเทอร์โมไดนามิกของ  $O_3/O_2$ ,  $O_2/H_2O$  และ  $H_2O/H_2$  ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

- 1) พื้นที่เหนือเส้น  $O_3/O_2$  หมายถึงสถานะเสถียรของโอโซน
- 2) พื้นที่ระหว่างเส้น  $O_3/O_2$  และ  $O_2/H_2O$  หมายถึงสถานะเสถียรของออกซิเจน
- 3) พื้นที่ระหว่างเส้น  $O_2/H_2O$  และ  $H_2O/H_2$  หมายถึงสถานะเสถียรของน้ำ
- 4) พื้นที่ใต้เส้น  $H_2O/H_2$  หมายถึงสถานะเสถียรของไฮโดรเจน

พิจารณารูปที่ 3.1 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบเหล็ก-น้ำ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1)  $Fe^{2+}$  จะเสถียรภายใต้ pH ต่ำกว่า 6
- 2) การออกซิเดชันของ  $Fe^{2+}$  เป็น  $Fe(OH)_3$  จะเกิดขึ้นระหว่าง pH 1.5-6
- 3) การออกซิเดชันของ  $Fe^{2+}$  โดยแก๊สโอโซนจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ดังนั้นถ้าความต่างศักย์ระหว่างสมการทั้งสองนี้มีค่ามากขึ้น ก็จะมีแรงขับในการออกซิเดชันของ  $Fe^{2+}$  มีค่ามากขึ้นด้วย ในระบบโลหะชนิดอื่น ๆ กับน้ำ ก็พิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน

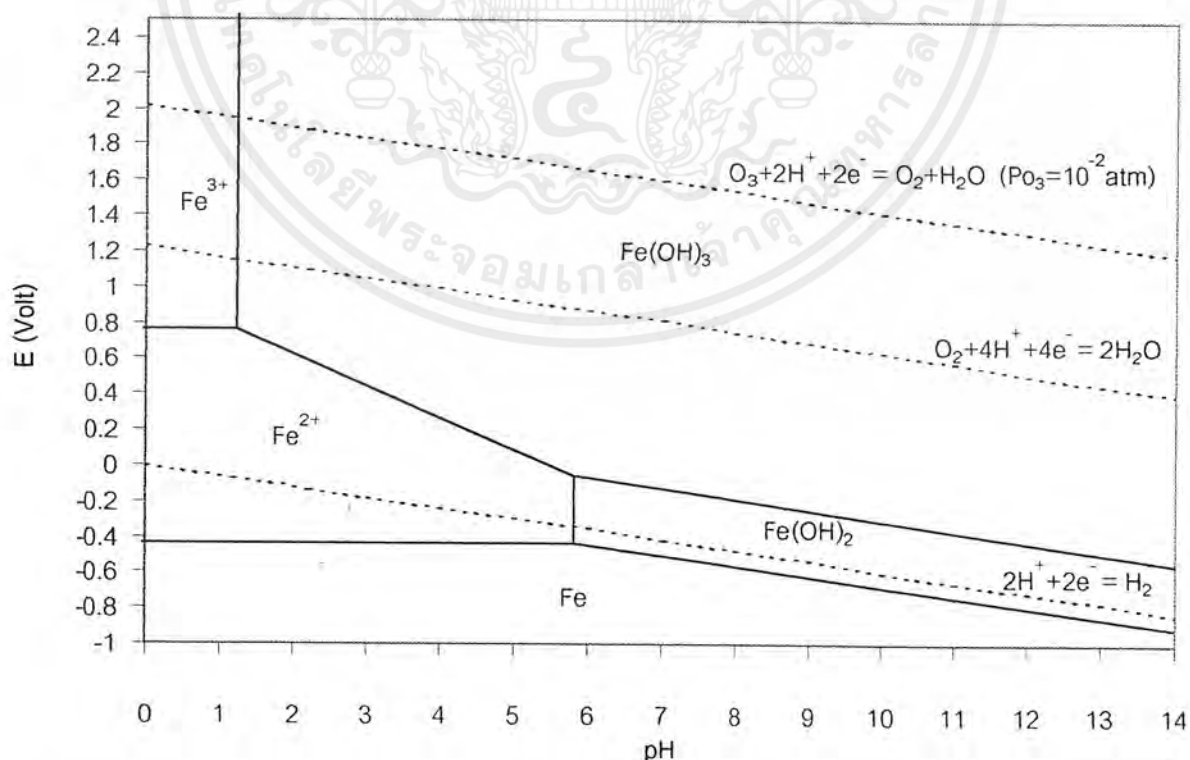
ตัวอย่างการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์-pH ของโลหะหนักบางชนิดกับน้ำ แสดงในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบเหล็ก-น้ำ ที่  
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$	$E = -0.44 + 0.0295 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	$E = 0.771$
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	$E = 1.35 - 0.1773(\text{pH}) - 0.0591 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O}$	$E = -0.0635 - 0.0591(\text{pH})$
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 5.8454 - 0.5 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 0.2817 - 0.0591(\text{pH})$
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ = \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 1.1426 - 0.33 \log a_{\text{Fe}^{3+}}$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	$E = -0.0591(\text{pH}) - 0.0295 \log P_{\text{H}_2}$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.228 - 0.0591(\text{pH}) + 0.0148 \log P_{\text{O}_2}$
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{\text{O}_3} / P_{\text{O}_2}) + 0.0591 \log a_{\text{H}^+}$

รูปที่ 3.1 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบเหล็ก-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร

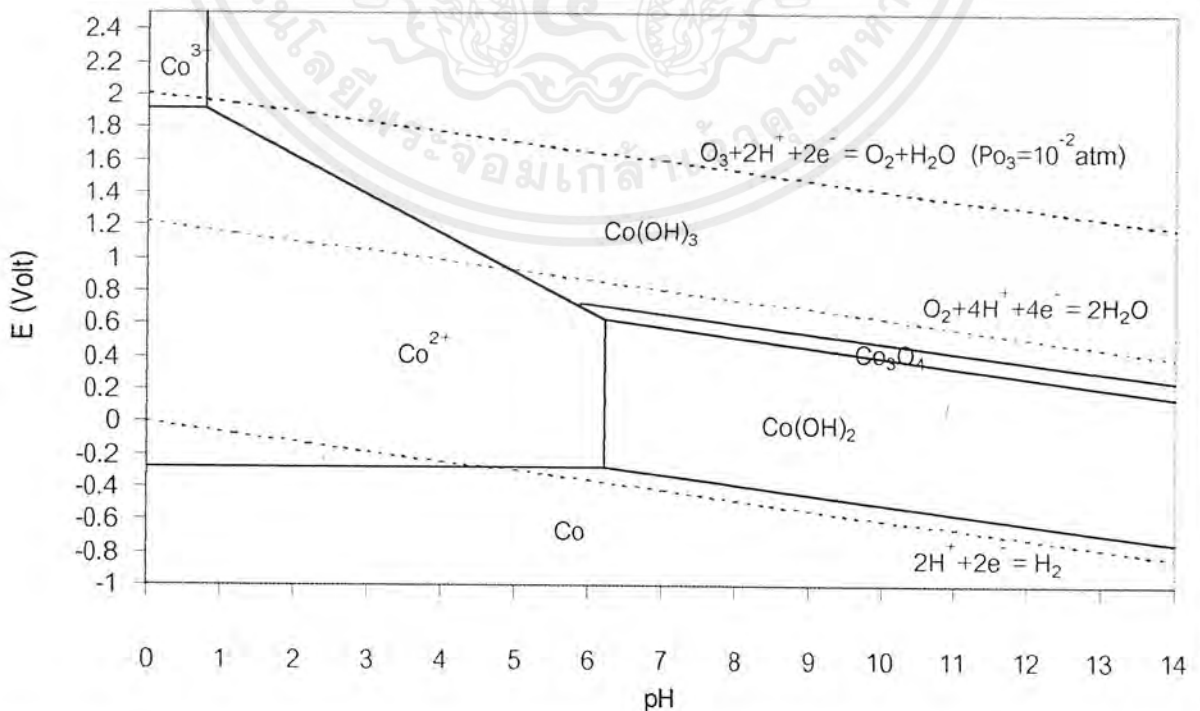


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบโคบอลต์-น้ำ ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Co}$	$E = -0.277 + 0.0296 \log a_{\text{Co}^{2+}}$
$\text{Co}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Co} + 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 0.095 - 0.059(\text{pH})$
$\text{Co}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Co}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 6.30 - 0.5 \log a_{\text{Co}^{2+}}$
$\text{Co}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 3\text{Co}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	$E = 2.111 - 0.2364(\text{pH}) - 0.0886 \log a_{\text{Co}^{2+}}$
$\text{Co}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 3\text{Co}(\text{OH})_2$	$E = 0.993 - 0.0591(\text{pH})$
$\text{Co}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Co}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.746 - 0.1773(\text{pH}) - 0.0591 \log a_{\text{Co}^{2+}}$
$3\text{Co}(\text{OH})_3 + \text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Co}_3\text{O}_4$	$E = 1.018 - 0.0591(\text{pH})$
$\text{Co}^{3+} + \text{e}^- = \text{Co}^{2+}$	$E = 1.808$
$\text{Co}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ = \text{Co}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 1.049 - 0.333 \log a_{\text{Co}^{3+}}$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	$E = -0.0591(\text{pH}) - 0.0295 \log P_{\text{H}_2}$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.228 - 0.0591(\text{pH}) + 0.0148 \log P_{\text{O}_2}$
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{\text{O}_3} / P_{\text{O}_2}) + 0.0591 \log a_{\text{H}^+}$

รูปที่ 3.2 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบโคบอลต์-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร

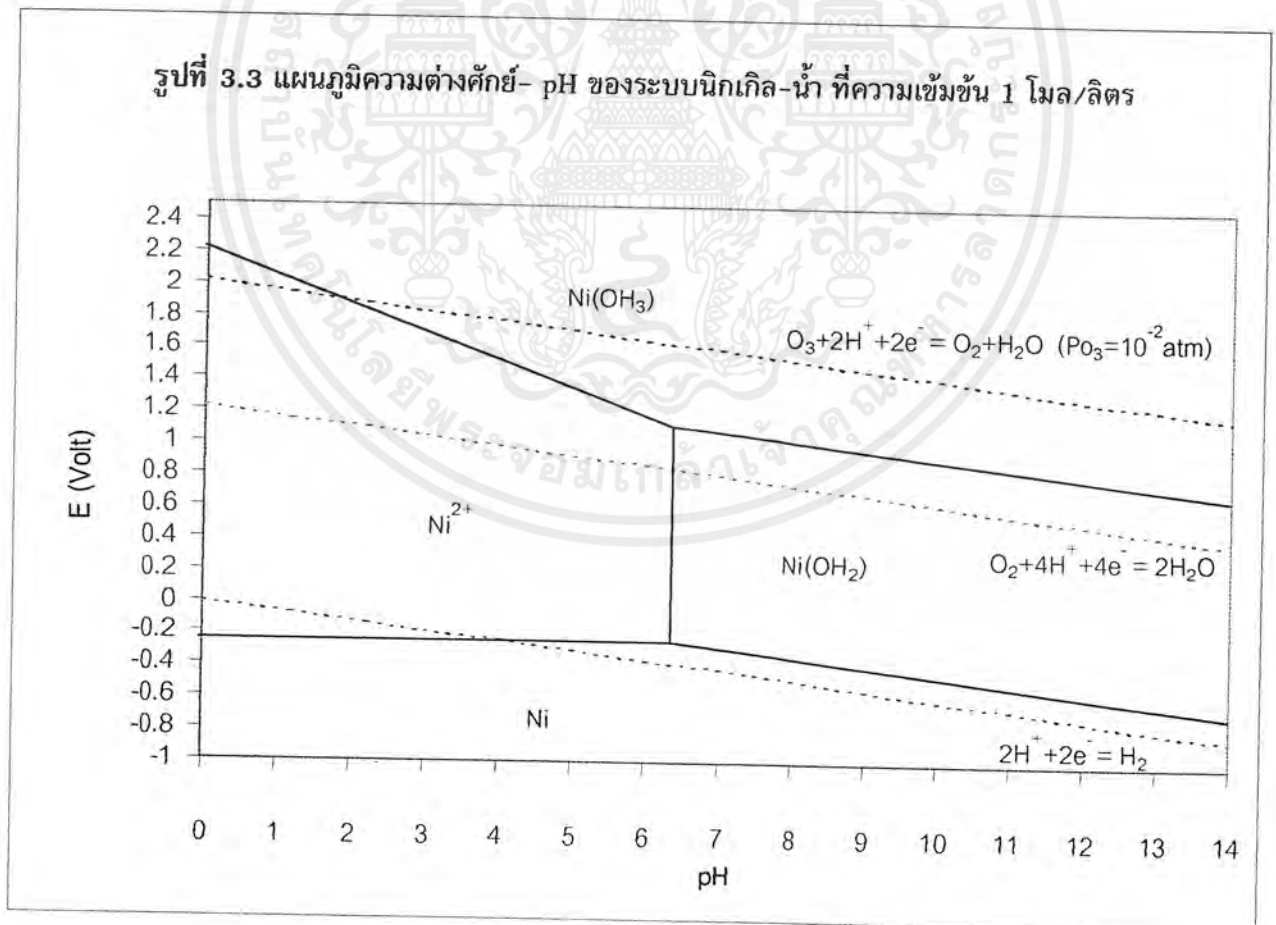


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบนิกเกิล-น้ำ ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	$E = -0.236 + 0.0295 \log a_{\text{Ni}^{2+}}$
$\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Ni} + 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 0.14 - 0.0591(\text{pH})$
$\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Ni}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 6.37 - 0.5 \log a_{\text{Ni}^{2+}}$
$\text{Ni}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Ni}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	$E = 2.232 - 0.1773(\text{pH})$
$\text{Ni}(\text{OH})_3 + \text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 1.478 - 0.0591(\text{pH})$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	$E = -0.0591(\text{pH}) - 0.0295 \log P_{\text{H}_2}$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.228 - 0.0591(\text{pH}) + 0.0148 \log P_{\text{O}_2}$
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{\text{O}_3} / P_{\text{O}_2}) + 0.0591 \log a_{\text{H}^+}$

รูปที่ 3.3 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบนิกเกิล-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การดำเนินงาน

#### 4.1 ขั้นตอนการทดลอง

เมื่อได้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง โดยแบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

##### ตอนที่ 1 การทดลองหาปริมาณแก๊สไอโซนจากเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน

การตรวจวัดหาปริมาณของไอโซนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีอัลตราไวโอเลต สเปกโตรโฟโตเมทรี หรือการใช้เทคนิคทางอิมัลชัน ในโครงการนี้จะใช้วิธีการทางเคมีซึ่งเรียกว่า วิธีไอโอดิเมทริก (Iodometric methods) โดยมีหลักการคือ ใช้สารละลายที่มีความจำเพาะต่อการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สไอโซนสูง เช่น สารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) ทำให้ได้สารใหม่เกิดขึ้น จากนั้น สามารถหาปริมาณแก๊สไอโซนได้โดยการไตเตรตกับสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไทโอซัลเฟต หรือฟีนิลาซีนออกไซด์ เป็นต้น

##### 1) สารเคมี

1.1) สารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก โดยละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์จำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน เก็บไว้ในขวดสีชา 1 คืน ก่อนนำมาใช้

1.2) สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มอล

1.3) สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มอล โดยละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 25 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

1.4) น้ำแป้งเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยละลายแป้ง 1 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2) เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน

เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง

ปั๊มอากาศ

ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร

บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร

ปิเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร

นาฬิกาจับเวลา

สายยางซิลิโคนชนิดพิเศษ

3) สภาวะที่ทำการทดลอง

อัตราเร็วของอากาศ 14.5 ลิตร/นาที

ความต่างศักย์ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง 12 กิโลโวลต์

ความถี่ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง 50 เฮิรท์ซ

อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

ความดัน 1 บรรยากาศ

เวลาที่ใช้ในการทดลอง 10 นาที

4) วิธีการทดลอง

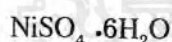
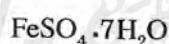
4.1) การดูดซึมแก๊สไอโซน (Absorption)

ดำเนินการทดลองโดยการผ่านแก๊สจากชุดทดลองลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายโพแตสเซียมไฮไดรด์ บรรจุอยู่ 100 มิลลิลิตร



โครงการนี้จะศึกษาค่า pH ของสารละลายเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล โดยจะใช้ข้อมูลจาก แผนภูมิความต่างศักย์-pH (รูปที่ 3.1-3.3) เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการหาช่วงของ pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะหนัก ให้อยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดก็จะมีช่วงของ pH ที่แตกต่างกัน คือ เหล็กควรมีค่า pH อยู่ใน ช่วง 1.2-5.8 เพื่อให้เกิดตะกอนเคมีในรูป  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  โคบอลต์ควรมีค่า pH อยู่ในช่วง 1.2-6.4 เพื่อให้เกิดตะกอนเคมีในรูป  $\text{Co}(\text{OH})_3$  และนิกเกิลควรมีค่า pH อยู่ในช่วง 0-6.3 เพื่อให้เกิดตะกอนเคมีในรูป  $\text{Ni}(\text{OH})_3$  แต่ในการทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของโลหะ 0.1 กรัม/ลิตร ดังนั้นแผนภูมิความต่างศักย์-pH จึงเปลี่ยนไปตั้งแสดงในภาคผนวก ค โดยค่า pH สำหรับเหล็กจะอยู่ในช่วง 2.1-7.2 โคบอลต์อยู่ในช่วง 1.9-8.2 และนิกเกิลอยู่ในช่วง 0-7.7

1) สารเคมี



HCl ความเข้มข้น 1 นอร์มอล

NaOH ความเข้มข้น 1 นอร์มอล

KI ความเข้มข้น 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

2) เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน

เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง

ปั๊มอากาศ

เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

pH meter

เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก

อุปกรณ์เติมไอโซน

ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร

บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร  
 กระจกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร  
 กรวยกรอง  
 นาฬิกาจับเวลา  
 ขวดเก็บสารตัวอย่าง  
 สายยางซิลิโคนชนิดพิเศษ  
 กระดาษกรองเบอร์ 1  
 จุกยาง

3) สภาวะที่ทำการทดลอง

อัตราเร็วของแก๊สไอโซน 20.88 มิลลิกรัม/ชั่วโมง  
 อัตราเร็วของอากาศ 14.5 ลิตร/นาที  
 ความต่างศักย์ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง 12 กิโลโวลต์  
 ความถี่ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง 50 เฮิรตซ์  
 กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง 3 แอมแปร์  
 อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส  
 ความดัน 1 บรรยากาศ  
 เวลาที่ใช้ในการทดลอง 90 นาที  
 pH ของเหล็กที่ศึกษาเท่ากับ 3, 4, และ 5  
 pH ของโคบอลต์ที่ศึกษาเท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7, และ 8  
 pH ของนิกเกิลที่ศึกษาเท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7, และ 8

4) วิธีการทดลอง

4.1) การเตรียมสารละลาย

(1) เตรียมสารละลายเหล็ก 0.1 กรัม/ลิตร จาก  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  โดยละลาย  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 0.4979 กรัม ในน้ำกลั่นแล้ว เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

(2) เตรียมสารละลายโคบอลต์ 0.1 กรัม/ลิตร จาก  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  โดยละลาย  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 0.4770 กรัม ในน้ำกลั่นแล้ว เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

(3) เตรียมสารละลายนิกเกิล 0.1 กรัม/ลิตร จาก  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  โดยละลาย  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 0.4479 กรัม ในน้ำกลั่นแล้ว เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

#### 4.2) การออกซิเดชัน

(1) ต่อเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโชนเข้ากับเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง และปั๊มอากาศ

(2) ต่ออุปกรณ์เติมไอโชนเข้ากับเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโชนด้วยสายยางซิลิโคนชนิดพิเศษ

(3) เติมน้ำสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในอุปกรณ์เติมไอโชนส่วนที่ใช้กำจัดแก๊สที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

(4) เติมน้ำสารละลายโลหะ ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร ในอุปกรณ์เติมไอโชน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

(5) เปิดเครื่องปั่นกวานแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที

(6) วัด pH ของสารละลายในอุปกรณ์เติมไอโชน แล้วปรับ pH ให้ได้ตามต้องการ โดยไตเตรตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเมื่อสารละลายโลหะเป็นเบสมากเกินไป หรือไตเตรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อสารละลายโลหะเป็นกรดมากเกินไป

(7) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะด้วยปิเปตขนาดปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในขวดเก็บตัวอย่าง เมื่อสารละลายโลหะมีค่า pH ตามต้องการ (ที่เวลา 0 นาที)

(8) เปิดปั๊มเพื่อปั๊มอากาศเข้าเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโชน

(9) เปิดเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์ พร้อมทั้งจับเวลา

(10) เก็บตัวอย่างของสารละลายโลหะทุก ๆ 10 นาที ด้วยปิเปตขนาดปริมาตร 10 มิลลิลิตร และปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา

(11) กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(12) นำตัวอย่างของสารละลายที่ได้ ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 248.3 นาโนเมตร, 240.7 นาโนเมตร, และ 232.0 นาโนเมตร สำหรับเหล็ก, โคบอลต์, และนิกเกิล ตามลำดับ (การหาปริมาณธาตุโดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรีแสดงในภาคผนวก จ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลการทดลอง

##### ตอนที่ 1 การทดลองหาปริมาณแก๊สไอโซนจากเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน

ตารางที่ 5.1 ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) ที่ใช้ในการไตเตรต และปริมาณของแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้

ความต่างศักย์ของเครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง (กิโลโวลต์)	การทดลองครั้งที่	ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณของแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้ (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)
12	1	2.8	20.16
	2	3.0	21.60
	3	2.7	19.44
	4	2.9	20.88
	5	3.1	22.32

อัตราเฉลี่ยของแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้มีค่า

$$= (20.16 + 21.60 + 19.44 + 20.88 + 22.32)/5$$

$$= 20.88 \text{ มิลลิกรัม/ชั่วโมง}$$

## ตอนที่ 2 การออกซิเดชันโลหะเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิลด้วยโอโซน

ผลการทดลองที่ได้แสดงเป็นความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.2-5.4 ซึ่งค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองจริงจะแสดงในภาคผนวก ง

ตารางที่ 5.2 ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของเหล็ก (ppm)		
	pH 3	pH 4	pH 5
0	99.7	98.9	99.5
10	97.4	85.5	84.4
20	88.5	73.5	73.1
30	75.7	60.7	57.5
40	72.1	52.0	42.7
50	65.7	41.2	27.3
60	63.3	36.8	16.1
70	54.4	29.3	8.7
80	50.4	23.0	4.1
90	40.8	21.3	1.1

ตารางที่ 5.3 ความเข้มข้นของโคบอลต์ที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของโคบอลต์ (ppm)					
	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8
0	100.1	100.3	100.7	100.1	100.2	100.1
10	100.0	100.3	100.6	99.8	98.5	94.0
20	99.8	100.2	100.7	99.6	95.0	89.8
30	100.1	100.1	100.7	96.5	92.5	85.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของโคบอลต์ (ppm)					
	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8
40	99.7	100.2	100.7	94.1	91.7	80.0
50	99.8	100.1	100.1	92.1	91.0	76.4
60	100.0	99.8	100.2	91.9	90.3	71.0
70	99.7	100.1	100.1	89.0	88.1	64.9
80	99.9	99.9	100.5	86.5	84.2	61.3
90	99.8	100.1	100.6	84.1	79.1	57.1

ตารางที่ 5.4 ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ

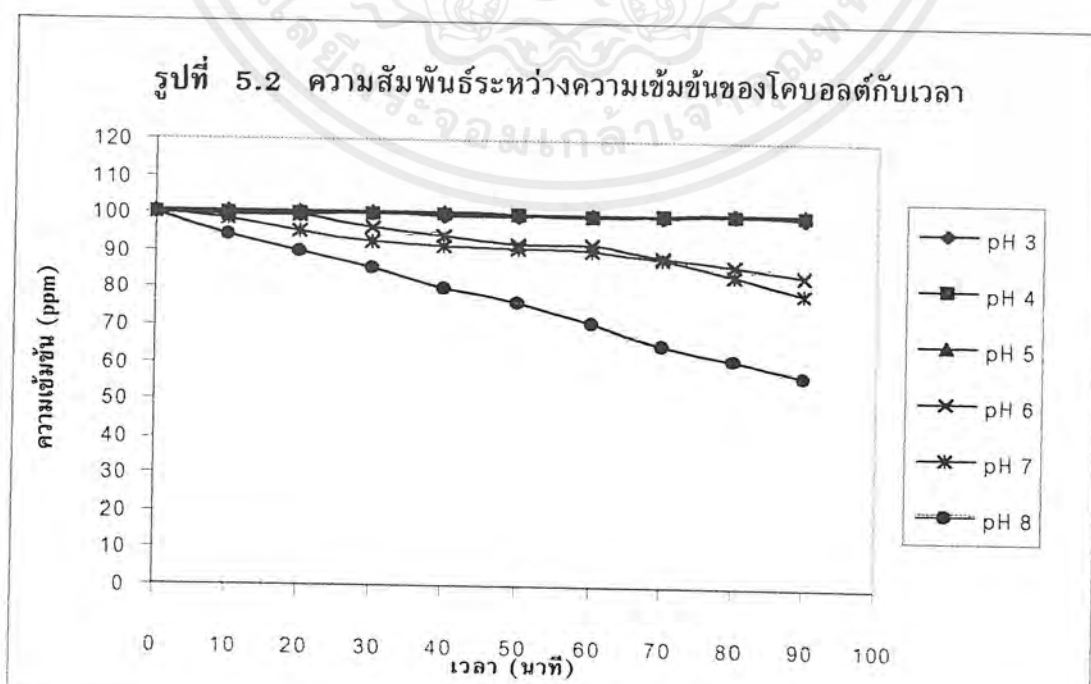
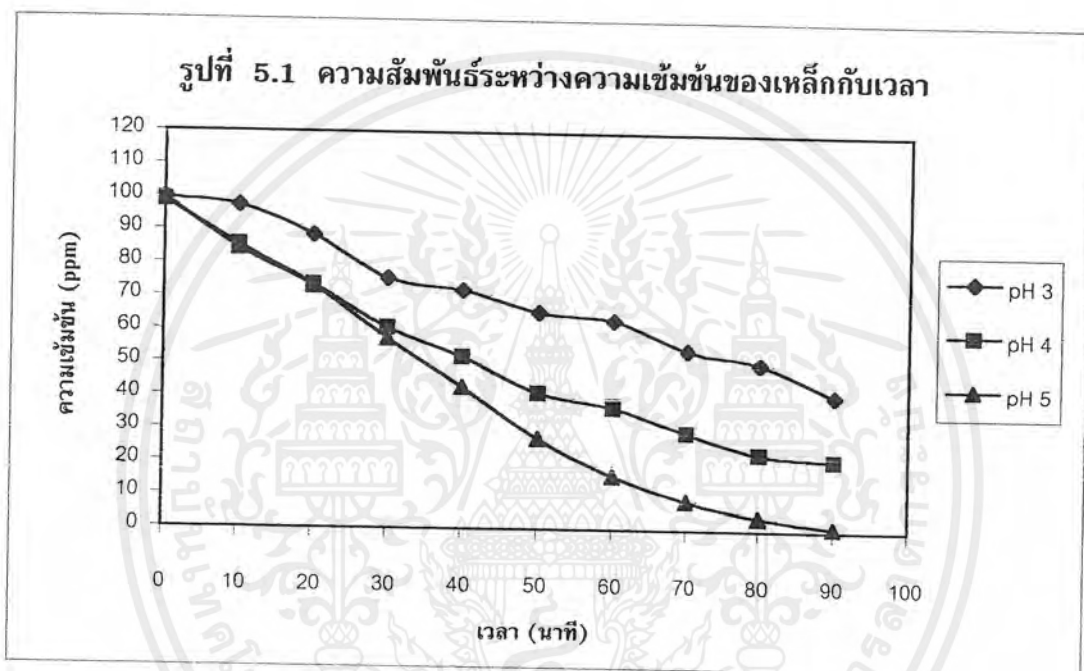
เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของนิกเกิล (ppm)					
	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8
0	100.2	100.6	100.1	100.3	100.5	100.1
10	100.1	100.4	100.5	100.6	98.8	98.9
20	100.3	100.4	100.4	100.3	97.5	98.1
30	100.2	99.9	100.4	100.1	96.6	96.4
40	99.8	100.1	100.1	99.9	96.2	95.2
50	100.1	100.5	100.3	99.8	95.8	93.4
60	99.7	100.6	100.1	100.0	95.0	92.1
70	99.8	100.1	100.3	100.3	94.8	90.6
80	100.1	100.1	100.3	100.1	94.6	87.5
90	100.2	100.2	100.0	100.2	94.1	83.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

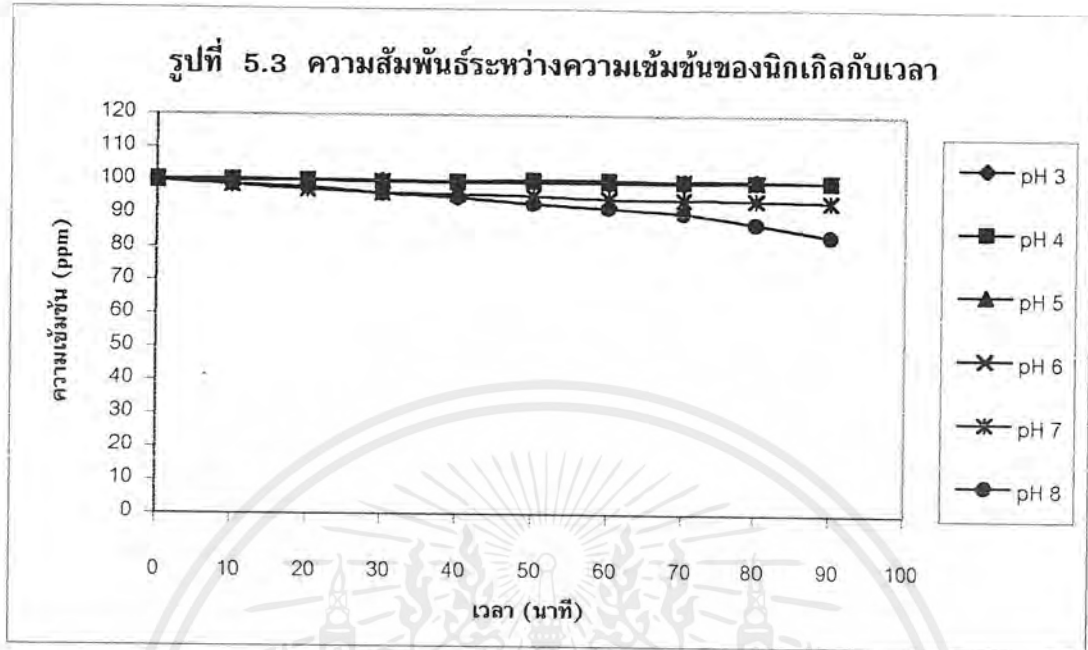
## 5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

### 1) การหา pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยโอโซน

จากผลการทดลอง สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่า pH ต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.1-5.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พิจารณารูปที่ 5.1 สำหรับสารละลายเหล็ก 0.1 กรัม/ลิตร (100 ppm) ที่ pH 5 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กลดลงเหลือ 1.1 ppm ภายในเวลา 90 นาที ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายเหล็กที่ pH 3 และ pH 4 โดยมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 40.8 ppm และ 21.3 ppm ที่เวลาเดียวกัน ตามลำดับ ส่วนที่ pH มากกว่า 5 จะเกิดตะกอนของ  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ซึ่งจะไม่ศึกษา ดังนั้น pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเหล็กด้วยไอโชน คือ ที่ pH 5

พิจารณารูปที่ 5.2 สำหรับสารละลายโคบอลต์ 0.1 กรัม/ลิตร (100 ppm) ที่ pH 8 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์ลดลงเหลือ 57.1 ppm ภายในเวลา 90 นาที ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายโคบอลต์ที่ pH 6 และ pH 7 โดยมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 84.1 ppm และ 79.1 ppm ที่เวลาเดียวกัน ตามลำดับ ส่วนที่ pH มากกว่า 8 จะเกิดตะกอนของ  $\text{Co}(\text{OH})_2$  ซึ่งจะไม่ศึกษา

ในกรณีของสารละลายโคบอลต์ที่ pH 3, pH 4 และ pH 5 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะคงที่ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้นหมายความว่า ที่ pH ดังกล่าวปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 5.3 สำหรับสารละลายนิกเกิล 0.1 กรัม/ลิตร (100 ppm) พบว่า ที่ pH 7 และ pH 8 ความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที ส่วนที่ pH 3, pH 4, pH 5 และ pH 6 กราฟจะมีลักษณะคงที่ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้นหมายความว่า ที่ pH ดังกล่าวปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่เกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าปริมาณของแก๊สไอโซนที่ใช้ทำปฏิกิริยามีค่าน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถกำจัดสารละลายนิกเกิลให้มีปริมาณน้อยลงได้ ส่วนที่ pH มากกว่า 8 จะเกิดตะกอนของ  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  ซึ่งจะไม่ศึกษา

## 2) การหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา

จากจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยแก๊สไอโซน จะได้ว่า

$$-\frac{d[M(II)]}{dt} = k_0[M(II)]^l[O_3]^m[H^+]^n \quad (5.1)$$

เมื่อ  $[M(II)]$  = ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่อยู่ในรูป 2+, โมล/ลิตร  
 $t$  = เวลา, นาที  
 $[O_3]$  = ความเข้มข้นของแก๊สไอโซน, โมล/ลิตร  
 $[H^+]$  = ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน, โมล/ลิตร  
 $k_0$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมล<sup>(1-m-n)</sup>.ลิตร<sup>(m+n-1)</sup>.นาที<sup>-1</sup>  
 $l, m$  และ  $n$  = อันดับของปฏิกิริยา

เพื่อให้ผลการคำนวณหาอันดับของปฏิกิริยามีความถูกต้อง จึงพิจารณาเฉพาะช่วงต้นของกราฟ คือที่เวลา 0 ถึง 50 นาที (ในกรณี pH 5) ดังนั้นจากรูปที่ 5.1 และ 5.2 พบว่าที่ค่า pH หนึ่ง ๆ  $[M(II)]$  มีความสัมพันธ์กับเวลาในลักษณะเชิงเส้น แสดงว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย (ค่า  $l=0$ ) ในกรณีของนิกเกิล (รูปที่ 5.3) ไม่สามารถกำจัดได้โดยการเติมไอโซนจึงไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการออกซิเดชันโลหะด้วยแก๊สไอโซน จึงใช้ความเข้มข้นของแก๊สไอโซนคงที่ตลอดการทดลอง จากสมการที่ (5.1) จะได้

$$-\frac{d[M(II)]}{dt} = V = k[H^+]^n \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $V$  = อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย,  
โมล/ลิตร-นาที

$$k = k_0[O_3]^m$$

$$= \text{ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมล}^{(1-m)}\cdot\text{ลิตร}^{(m-1)}\cdot\text{นาที}^{-1}$$

ใส่ลอการิทึมฐานสิบในสมการที่ (5.2) จะได้

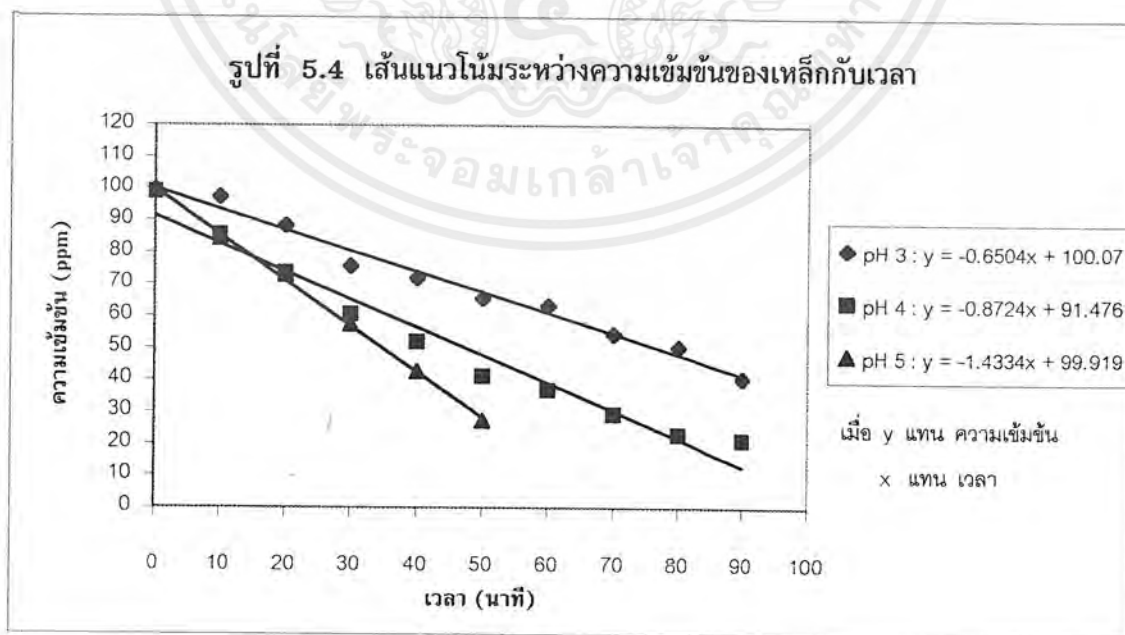
$$\log V = \log k + n \log [H^+] \quad (5.3)$$

จาก  $\text{pH} = -\log[H^+]$  สมการที่ (5.3) จะกลายเป็น

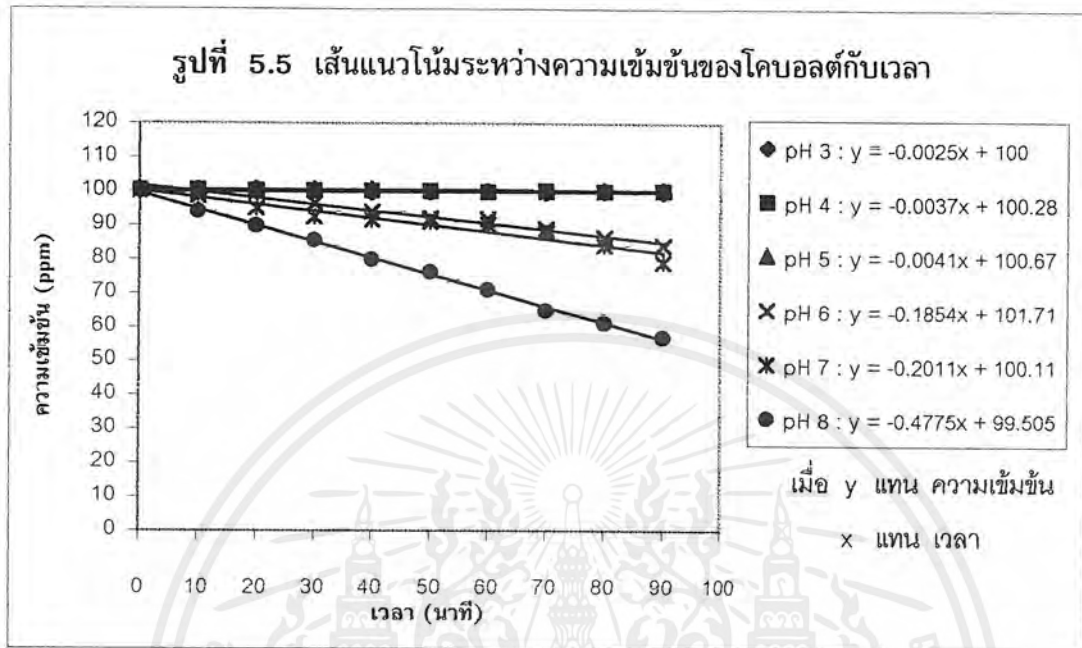
$$\log V = \log k - n \text{pH} \quad (5.4)$$

สามารถหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้จากสร้างกราฟระหว่าง  $\log V$  กับ  $\text{pH}$  โดยมีความชันเท่ากับ  $-n$  และ จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log k$

ค่า  $V$  สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้นของโลหะในสารละลายกับ  $\text{pH}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.4 สำหรับเหล็ก และรูปที่ 5.5 สำหรับโคบอลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 สามารถหาค่า  $\log V$  ของเหล็ก และโคบอลต์ ที่ pH ต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 ค่า  $\log V$  ที่ pH 3, 4, และ 5 สำหรับเหล็ก

pH	ความชัน (V) จากรูปที่ 5.4 (ppm/นาท)	ความชัน (V) (โมล/ลิตร-นาท)	$-\log V$
3	0.6504	$1.17 \times 10^{-5}$	4.93
4	0.8724	$1.57 \times 10^{-5}$	4.80
5	1.4334	$2.58 \times 10^{-5}$	4.59

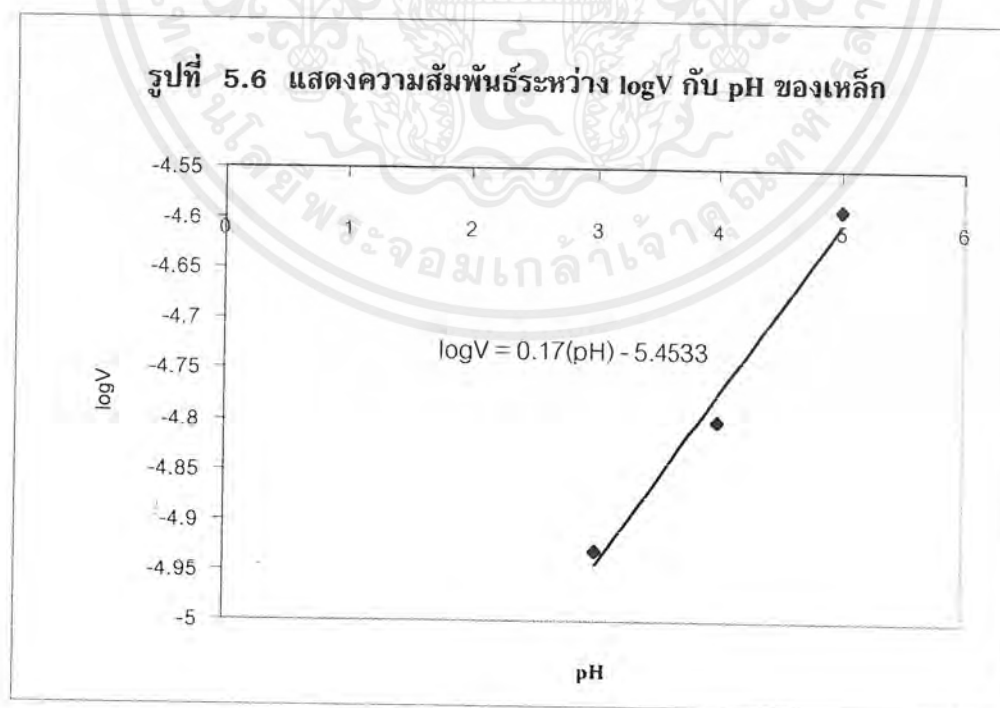
หมายเหตุ เหล็ก 1 ppm มีค่าเท่ากับ  $0.001/55.847 = 0.000018$  โมล/ลิตร

ตารางที่ 5.6 ค่า  $\log V$  ที่ pH 3, 4, 5, 6, 7, และ 8 สำหรับโคบอลต์

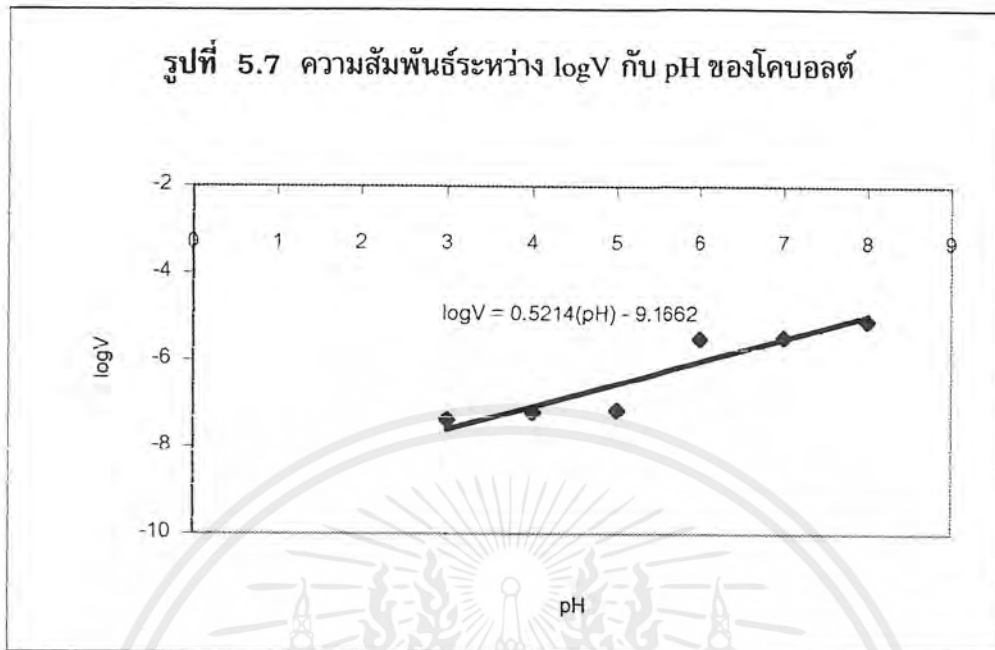
pH	ความชัน (V) จากรูปที่ 5.5 (ppm/นาที)	ความชัน (V) (โมล/ลิตร-นาที)	$-\log V$
3	0.0025	$4.25 \times 10^{-8}$	7.37
4	0.0037	$6.29 \times 10^{-8}$	7.20
5	0.0041	$6.97 \times 10^{-8}$	7.16
6	0.1854	$3.15 \times 10^{-6}$	5.50
7	0.2011	$3.42 \times 10^{-6}$	5.47
8	0.4775	$8.12 \times 10^{-6}$	5.09

หมายเหตุ โคบอลต์ 1 ppm มีค่าเท่ากับ  $0.001/58.9332 = 0.000017$  โมล/ลิตร

จากตารางที่ 5.5 และ 5.6 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log V$  กับ pH สำหรับเหล็ก และโคบอลต์ ได้ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 จะสามารถหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้ โดยอันดับของปฏิกิริยา = -ความชัน และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา =  $10^{\text{จุดตัดแกน}}$  ดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาสำหรับเหล็กและโคบอลต์

โลหะ	อันดับของปฏิกิริยา	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา
เหล็ก	-0.17	$3.52 \times 10^{-6}$
โคบอลต์	-0.5214	$6.82 \times 10^{-10}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1) ปริมาณแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซนมีค่า 20.88 มิลลิกรัม/ชั่วโมง โดยมีสถานะที่ใช้ในการทดลอง คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง 12 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ และใช้อากาศเป็นแก๊สป้อนซึ่งมีอัตราเร็ว 14.5 ลิตร/นาที โดยปริมาณของแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้ถือว่า มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณของแก๊สไอโซนที่สามารถสังเคราะห์ได้ในทางทฤษฎีที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเครื่องไม่เหมาะสม และจากปัจจัยต่าง ๆ อันได้แก่

1.1) ความยาวของท่อแก้ว ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สังเคราะห์แก๊สไอโซน มีความยาวน้อยเกินไป เป็นผลให้พื้นที่ในการสังเคราะห์แก๊สน้อยด้วย

1.2) ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในท่อแก้ว การซึ่งเส้นลวดภายในท่อแก้วไม่ตั้งพอ เป็นผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในท่อแก้ว อัตราการสังเคราะห์แก๊สไอโซนจึงลดลงด้วย

1.3) อุณหภูมิของเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน ซึ่งจะส่งผลต่ออัตรา การสลายตัวของแก๊สไอโซน โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการสลายตัวของแก๊สไอโซนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเทคนิคในการกำจัดความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นอย่างยิ่งต่อการปฏิบัติการของเครื่องสังเคราะห์แก๊สไอโซน

1.4) ความชื้นของแก๊สป้อน ซึ่งถ้าแก๊สมีความชื้นจะทำให้อัตราการสลายตัวของแก๊สไอโซนเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้ว ปริมาณของแก๊สไอโซนที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้แก๊สป้อนเป็นแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศ

2) ปฏิกริยาออกซิเดชันโลหะเหล็กด้วยไอโซนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH 5 และสามารถลดปริมาณของสารละลายเหล็กให้ลดลงจากความเข้มข้น 100 ppm เหลือเพียง 1.1 ppm หรือคิดเป็น 98-99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 90 นาที

ดังนั้นค่า pH 5 จึงเป็นค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันเพื่อกำจัดเหล็กออกจากสารละลายด้วยแก๊สไอโซนในสภาวะการทดลองนี้ และสามารถคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาได้เท่ากับ  $-0.17$  และ  $3.52 \times 10^{-6}$  โมล<sup>1.17</sup>.ลิตร<sup>-1.17</sup>.นาที่<sup>-1</sup> ตามลำดับ สรุปสมการอัตราเร็วของปฏิกริยาของสารละลายเหล็กจะเป็นดังสมการที่ (6.1)

$$-\frac{d[Fe(II)]}{dt} = 3.52 \times 10^{-6} [Fe(II)]^0 [H^+]^{-0.17} \quad (6.1)$$

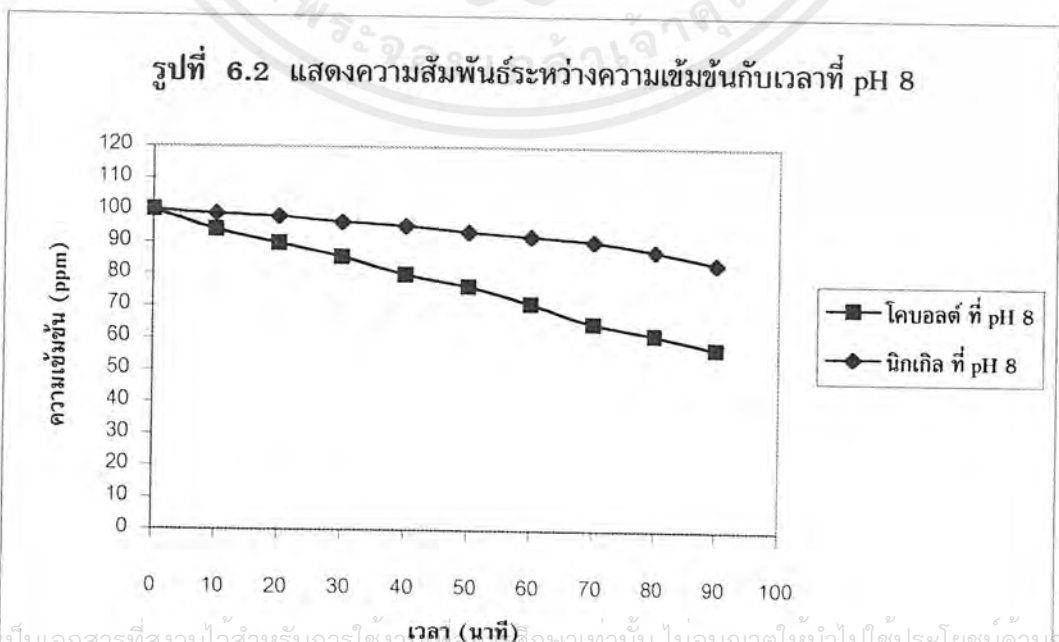
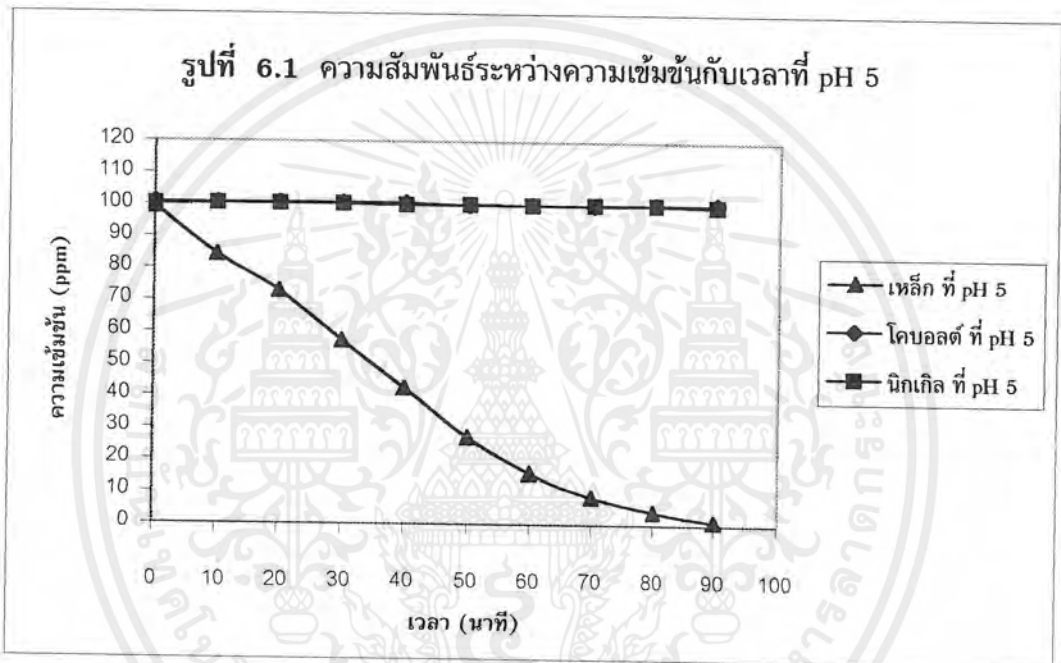
3) ปฏิกริยาออกซิเดชันโลหะโคบอลต์ด้วยไอโซนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH 8 และสามารถลดปริมาณของสารละลายโคบอลต์ให้ลดลงจากความเข้มข้น 100 ppm เหลือ 57.1 ppm หรือคิดเป็น 43 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 90 นาที

ดังนั้นค่า pH 8 จึงเป็นค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันเพื่อกำจัดโคบอลต์ออกจากสารละลายด้วยแก๊สไอโซนในสภาวะการทดลองนี้ และสามารถคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาได้เท่ากับ  $-0.5214$  และ  $6.82 \times 10^{-10}$  โมล<sup>1.5214</sup>.ลิตร<sup>-1.5214</sup>.นาที่<sup>-1</sup> ตามลำดับ สรุปอัตราเร็วของปฏิกริยาของสารละลายโคบอลต์จะเป็นดังสมการที่ (6.2)

$$-\frac{d[Co(II)]}{dt} = 6.82 \times 10^{-10} [Co(II)]^0 [H^+]^{-0.5214} \quad (6.2)$$

4) ปฏิกริยาออกซิเดชันโลหะนิกเกิลด้วยไอโซน จะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากในสภาวะที่ทำการทดลองนี้ ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณของแก๊สไอโซนที่สามารถสังเคราะห์ได้มีปริมาณน้อยเกินไป

5) จากค่า pH ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะเหล็กและโคบอลต์ คือ ที่ pH 5 และที่ pH 8 สามารถนำมาใช้แยกชนิดของสารละลายโลหะผสมเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิลได้โดยการเติมไฮดรอกไซด์ในสารละลายโลหะผสมดังกล่าวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งในขั้นแรกต้องควบคุมค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ 5 เพื่อแยกเหล็กให้ตกตะกอนออกมาในรูปของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  จากนั้นแยกโคบอลต์ออกจากนิกเกิลที่ pH 8 ซึ่งโคบอลต์จะตกตะกอนในรูป  $\text{Co}(\text{OH})_3$  ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการต่อไป

- 1) ศึกษาและเปรียบเทียบปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยโอโซน เมื่อใช้แก๊สป้อน เป็นแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศ
- 2) ศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการออกซิเดชันโลหะด้วยโอโซน เช่น ปริมาณของแก๊สโอโซน ความชื้นของแก๊สป้อน และอุณหภูมิของระบบ เป็นต้น
- 3) ศึกษาการออกซิเดชันโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ด้วยโอโซน เช่น แมงกานีส สังกะสี ตะกั่ว เป็นต้น



## บรรณานุกรม

- [1] Eckenfelder, W. W. Jr. "Industrial Water Pollution Control," 2<sup>nd</sup> ed, McGraw-Hill, Newyork, 1989.
- [2] Cheremisinoff, N. P. and Cheremisinoff, P. N. "Water Treatment and Waste Recovery," Prentice Hall, 1993.
- [3] Rice, R. G. and Aharan Net/er. "Handbook of ozone technology and application," Volumn 1. Ann Arbor Science Publishers, 1984.
- [4] Bryant, E. A., Futton, G. P., and Budd, G. C. "Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water," Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [5] บติศร มั่นเกษตรกิจ และ มยุรี วิชัย. "เครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซน," ปรึญญาธิพนธ์ ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
- [6] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. "การบำบัดน้ำเสีย," มิตรนราการพิมพ์, 2539.
- [7] Rieger, P. H. "Eletrochemistry," Prentice Hall, 1987.
- [8] วัชรี ชาตกิตติคุณวงศ์. "ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์เคมีพื้นฐาน," แมคกรอ-ฮิลล์, 2540.
- [9] Stumm, W. and Morgan, J. J. "Aquatic Chemistry Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters," John Wiley & Sons, 1996.
- [10] กฤษณา ชูติมา. "หลักเคมีทั่วไป," เล่มที่ 2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [11] Faust, S. D. and Aly, O. M. "Chemistry of Water Treatment," 2<sup>nd</sup>ed. Ann Arbor Press,Inc., 1998.
- [12] Glofford, D., Subramonian S., and Thomas, J. S. "Environmental Scienc Technology," 1986.
- [13] Reckhow, D. A., Knocke, W. R., and Kearney, M. J. "Ozone Science & Engineering," Vol.13,1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. “หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ,” ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัดชวนพิมพ์, 2535.
- [15] เขมรัฐ วงศ์ทิมารัตน์, ทนงฤทธิ จิโรจน์กุล, บวร อังคนาวีศัลย์ และ บัณฑิต ปั้น ประไพ. “เครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์,” ปรินุญานิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
- [16] Kuzuta Kitahara. “Ozone generator with silent discharge tube of special constructure,” Pharmaceutical Faculty, University of Kumamoto, 1960.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Reaction	$E^\circ, V$
$F_2 + 2e^- \rightarrow 2F^-$	2.87
$S_2O_8^{2-} + 2e^- \rightarrow 2SO_4^{2-}$	1.96
$Co^{3+} + e^- \rightarrow Co^{2+}$	1.92
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$	1.763
$Ce^{4+} + e^- \rightarrow Ce^{3+}$ (in 1 M HClO <sub>4</sub> )	1.70
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51
$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$	1.358
$Tl^{3+} + 2e^- \rightarrow Tl^+$	1.25
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229
$Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	1.065
$AuCl_4^- + 3e^- \rightarrow Au + 4Cl^-$	1.002
$Pd^{2+} + 2e^- \rightarrow Pd$	0.915
$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	0.799 1
$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771
$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2$	0.695
$I_2(s) + 2e^- \rightarrow 2I^-$	0.535
$Cu^+ + e^- \rightarrow Cu$	0.520
$Fe(CN)_6^{3-} + e^- \rightarrow Fe(CN)_6^{4-}$	0.361
$Co(dip)^{3+} + e^- \rightarrow Co(dip)^{2+}$	0.34
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	0.34
$Ge^{2+} + 2e^- \rightarrow Ge$	0.247
$PdI_4^{2-} + 2e^- \rightarrow Pd + 4I^-$	0.18
$Sn^{4+} + 2e^- \rightarrow Sn^{2+}$	0.15
$Ag(S_2O_3)_3^{3-} + e^- \rightarrow Ag + 2S_2O_3^{2-}$	0.017
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0.000 0
$Ge^{4+} + 2e^- \rightarrow Ge^{2+}$	0.00
$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	-0.14
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	-0.257
$Tl^+ + e^- \rightarrow Tl$	-0.336
$Cd^{2+} + 2e^- \rightarrow Cd$	-0.403
$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	-0.44
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0.762 6
$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2.713
$Li^+ + e^- \rightarrow Li$	-3.040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 พลังงานอิสระกิบส์ที่สภาวะมาตรฐาน ( $\Delta G^0$ ) ของสารบางชนิด

Species	$\Delta G^0$ (kJ/mol)
Co (Metal)	0
Co <sup>2+</sup> (aq)	-54.4
Co <sup>3+</sup> (aq)	-134.0
HCoO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (aq)	-407.5
Co(OH) <sub>2</sub> (aq)	-369.0
Co(OH) <sub>3</sub> (aq)	-596.6
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Cobalt Spinel)	-725.5
Cu (Metal)	0
Cu <sup>2+</sup> (aq)	65.5
CuO (Tenorite)	-129.7
Cu <sub>2</sub> O	-146.0
Fe (Metal)	0
Fe <sup>2+</sup> (aq)	-78.87
Fe(OH) <sub>2</sub> (aq)	-486.6
Fe <sup>3+</sup> (aq)	-4.60
Fe(OH) <sub>3</sub> (aq)	-696.6
H <sub>2</sub> (g)	0
H <sup>+</sup> (aq)	0
H <sub>2</sub> O (l)	-237.18
Mn (Metal)	0
Mn <sup>2+</sup> (aq)	-228.0
Mn(OH) <sub>2</sub> (precip.)	-616.0
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Hausmannite)	-1281.0
MnO <sub>2</sub> (Manganate) (IV)	-453.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 (ต่อ)

Species	$\Delta G^0$ (kJ/mol)
Ni (Metal)	0
Ni <sup>2+</sup> (aq)	-45.6
Ni(OH) <sub>2</sub>	-447.3
O <sub>2</sub> (g)	0
O <sub>3</sub> (g)	163.2
Pb (Metal)	0
Pb <sup>2+</sup> (aq)	-24.39
PbO (yellow)	-187.9
PbO <sub>2</sub>	-217.4
Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-601.2
Zn (Metal)	0
Zn <sup>2+</sup> (aq)	-147.0
Zn(OH) <sub>2</sub> (aq)	-522.3

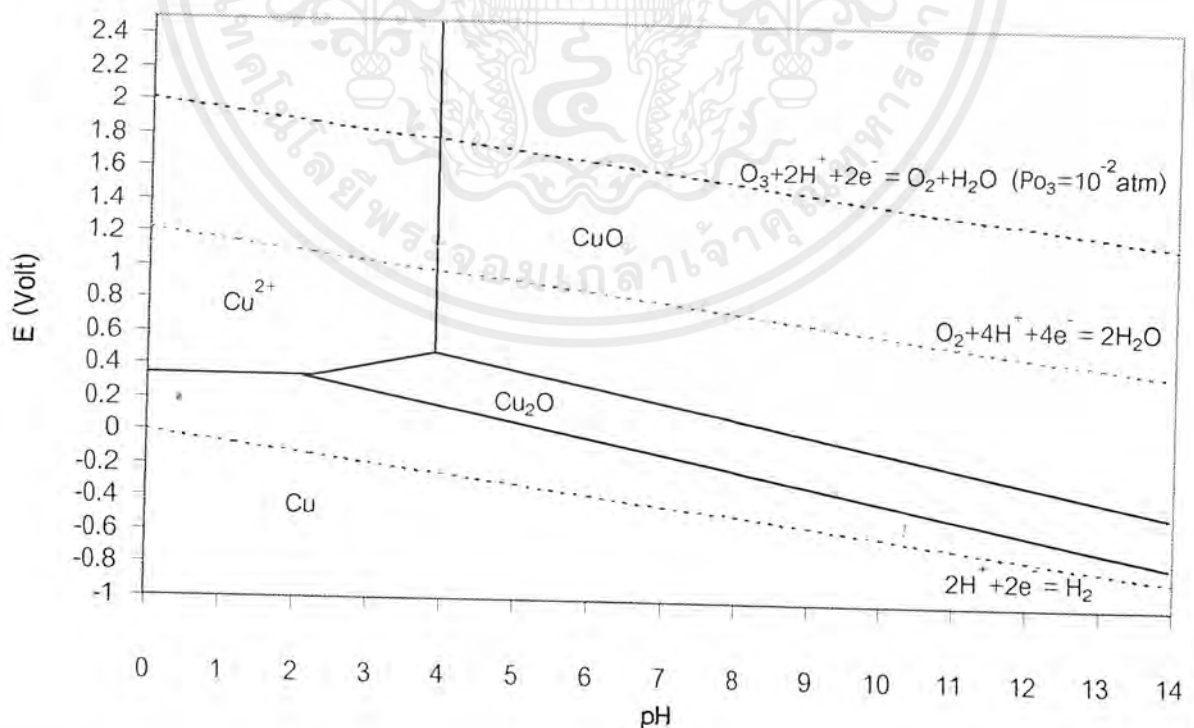
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 ความสัมพันธ์และแผนภูมิระหว่างความต่างศักย์-pH สำหรับระบบโลหะหนัก-น้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ความเข้มข้นของสารละลาย 1 โมล/ลิตร)

ระบบทองแดง-น้ำ

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	$E = 0.3702 + 0.0295 \log a_{\text{Cu}^{2+}}$
$\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$	$E = 0.471 - 0.0591(\text{pH})$
$2\text{Cu}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = \text{Cu}_2\text{O} + 2\text{H}^+$	$E = 0.203 + 0.0591(\text{pH}) + 0.0591 \log a_{\text{Cu}^{2+}}$
$2\text{CuO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$E = 0.669 - 0.0591(\text{pH})$
$2\text{Cu}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = \text{Cu}_2\text{O} + 2\text{H}^+$	$E = 0.206 + 0.0591(\text{pH}) + 0.0591 \log a_{\text{Cu}^{2+}}$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	$E = -0.0591\text{pH} - 0.0295 \log P_{\text{H}_2}$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.228 - 0.0591(\text{pH}) + 0.0148 \log P_{\text{O}_2}$
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{\text{O}_3} / P_{\text{O}_2}) + 0.0591 \log a_{\text{H}^+}$

รูปที่ ก.1 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบทองแดง-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร



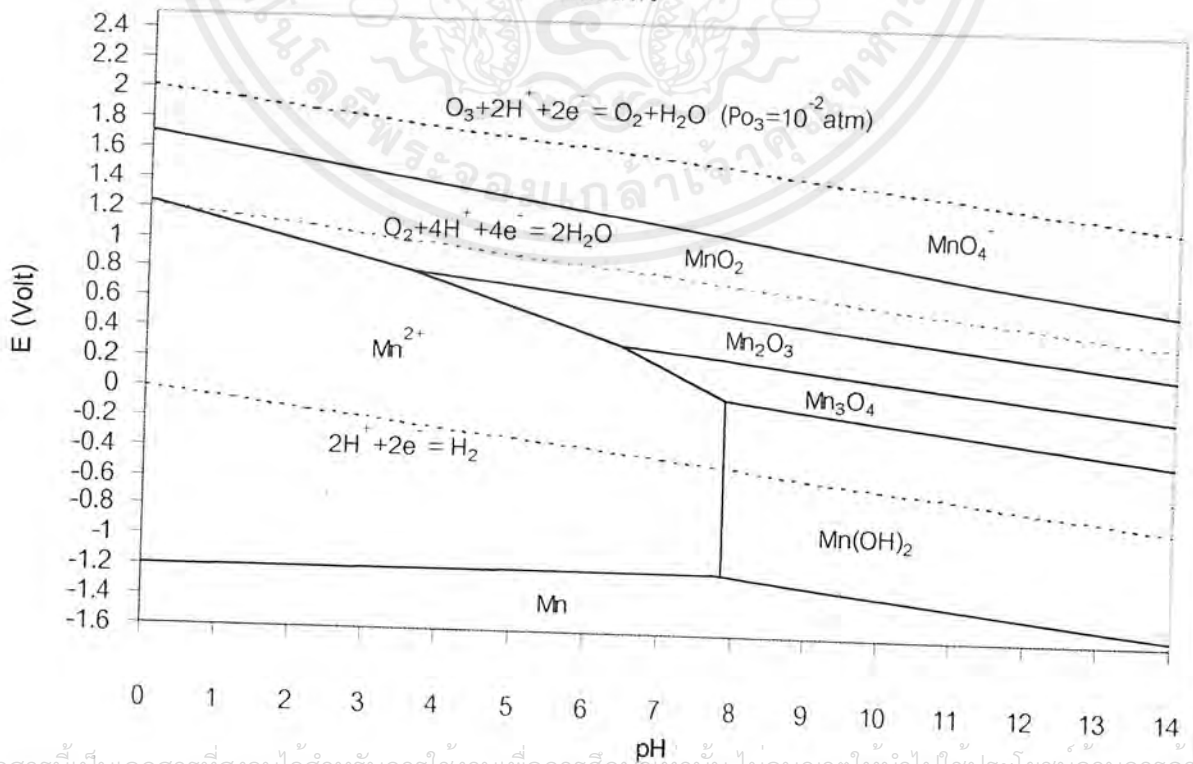
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 (ต่อ)

ระบบแมงกานีส-น้ำ

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$Mn^{2+} + 2e^- = Mn$	$E = -1.18 + 0.0295 \log a_{Mn^{2+}}$
$Mn^{2+} + 2H_2O = Mn(OH)_2 + 2H^+$	$pH = 7.66 - 0.5 \log a_{Mn^{2+}}$
$3Mn_2O_3 + 2H^+ + 2e^- = 2Mn_3O_4 + H_2O$	$E = 0.758 - 0.0591(pH)$
$Mn_3O_4 + 2H_2O + 2H^+ + 2e^- = 2Mn(OH)_2$	$E = 0.512 - 0.0591(pH)$
$Mn(OH)_2 + 2H^+ + 2e^- = Mn + 2H_2O$	$E = -0.728 - 0.0591(pH)$
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- = MnO_2 + 2H_2O$	$E = 1.692 - 0.0788(pH) + 0.0197 \log a_{MnO_4^-}$
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- = Mn^{2+} + 2H_2O$	$E = 1.23 - 0.1182(pH) - 0.0295 \log a_{Mn^{2+}}$
$Mn_2O_3 + 6H^+ + 2e^- = 2Mn^{2+} + 3H_2O$	$E = 1.44 - 0.177(pH) - 0.0591 \log a_{Mn^{2+}}$
$2MnO_2 + 2H^+ + 2e^- = Mn_2O_3 + H_2O$	$E = 1.014 - 0.0591(pH)$
$Mn_3O_4 + 8H^+ + 2e^- = 3Mn^{2+} + 4H_2O$	$E = 1.824 - 0.236(pH) - 0.0885 \log a_{Mn^{2+}}$
$2H^+ + 2e^- = H_2$	$E = -0.0591(pH) - 0.0295 \log P_{H_2}$
$O_2 + 4H^+ + 2e^- = 2H_2O$	$E = 1.228 - 0.0591(pH) + 0.0148 \log P_{O_2}$
$O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{O_3} / P_{O_2}) + 0.0591 \log a_{H^+}$

รูปที่ ก.2 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบแมงกานีส-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร



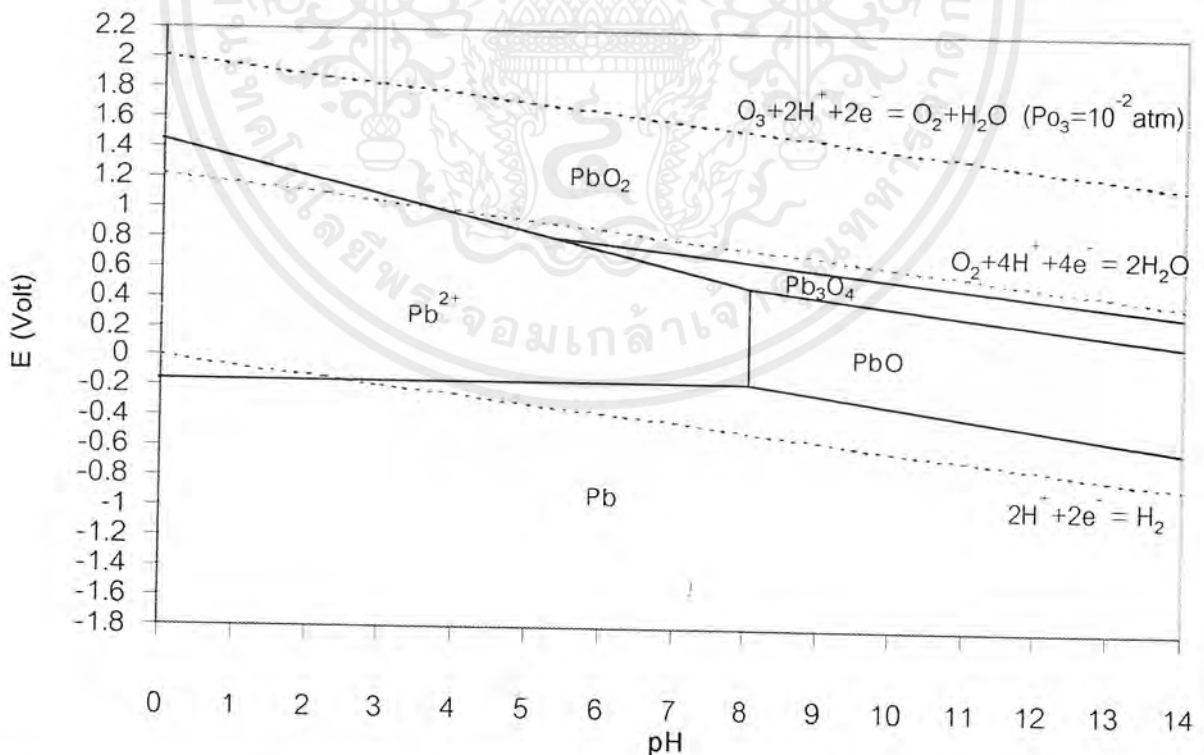
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตาราง ก.3 (ต่อ)

## ระบบตะกั่ว-น้ำ

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pb}$	$E = -0.126 + 0.0295 \log a_{\text{Pb}^{2+}}$
$\text{PbO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Pb} + \text{H}_2\text{O}$	$E = 0.248 - 0.0591(\text{pH})$
$\text{Pb}_3\text{O}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 3\text{PbO} + \text{H}_2\text{O}$	$E = 0.972 - 0.0591(\text{pH})$
$3\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = \text{Pb}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.127 - 0.0591(\text{pH})$
$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.457 - 0.1182(\text{pH}) - 0.02955 \log a_{\text{Pb}^{2+}}$
$\text{PbO} + 2\text{H}^+ = \text{Pb}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 8.102 - 0.5 \log a_{\text{Pb}^{2+}}$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	$E = -0.0591(\text{pH}) - 0.0295 \log P_{\text{H}_2}$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.228 - 0.0591(\text{pH}) + 0.0148 \log P_{\text{O}_2}$
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{\text{O}_3} / P_{\text{O}_2}) + 0.0591 \log a_{\text{H}^+}$

รูปที่ ก.3 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบตะกั่ว-น้ำ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

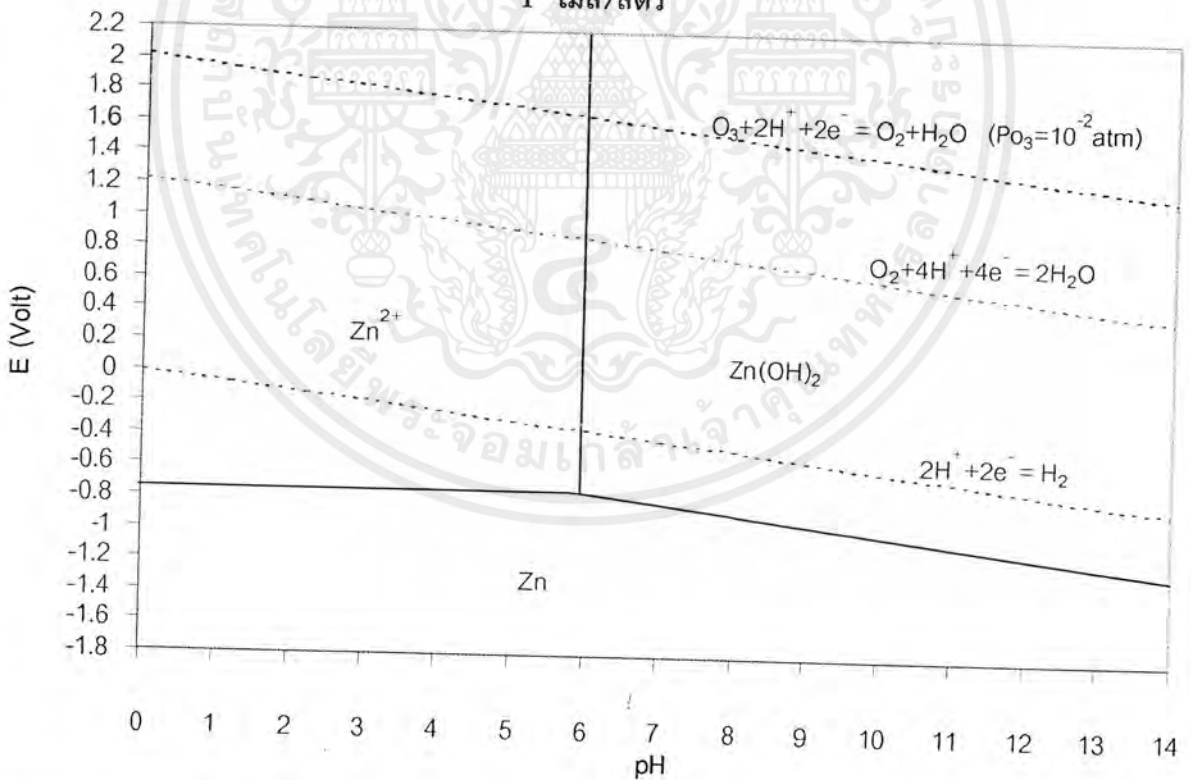
ตาราง ก.3 (ต่อ)

ระบบสังกะสี-น้ำ

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$Zn^{2+} + 2e^- = Zn$	$E = -0.763 + 0.0295 \log a_{Zn^{2+}}$
$Zn^{2+} + 2H_2O = Zn(OH)_2 + 2H^+$	$pH = 5.94 - 0.5 \log a_{Zn^{2+}}$
$Zn(OH)_3 + 2H^+ + 2e^- = Zn + 2H_2O$	$E = -0.411 - 0.0591(pH)$
$2H^+ + 2e^- = H_2$	$E = -0.0591(pH) - 0.0295 \log P_{H_2}$
$O_2 + 4H^+ + 2e^- = 2H_2O$	$E = 1.228 - 0.0591(pH) + 0.0148 \log P_{O_2}$
$O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{O_3} / P_{O_2}) + 0.0591 \log a_{H^+}$

รูปที่ ก.4 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบสังกะสี-น้ำ ที่ความเข้มข้น

1 โมล/ลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH

#### พิจารณาระบบเหล็ก-น้ำ

##### 1) กรณีที่มีอิเล็กตรอนปรากฏในปฏิกิริยา



จากสมการของเนิร์นสต์ (3.13)

$$E = E^0 - \frac{0.0591}{n} \log K_{eq} \quad (3.13)$$

จากตาราง ก.1 สามารถหาค่า  $E^0$  ของปฏิกิริยาได้เท่ากับ  $-0.44$  โวลต์

จากปฏิกิริยาจำนวนอิเล็กตรอน ( $n$ ) เท่ากับ 2

จากสมการ (3.7) จะได้ว่า

$$K_{eq} = a_{\text{Fe}} / a_{\text{Fe}^{2+}}$$

และจากหัวข้อที่ 3.1 ค่าแอกติวิตีของเหล็กบริสุทธิ์จะเท่ากับ 1

เพราะฉะนั้น

$$K_{eq} = 1 / a_{\text{Fe}^{2+}}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.13)

$$E = -0.44 - \frac{0.0591}{2} \log(1 / a_{\text{Fe}^{2+}})$$

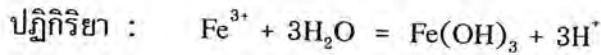
$$E = -0.44 + 0.0295 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$$

#### เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีที่ไม่มีอิเล็กตรอนปรากฏในปฏิกิริยา

กรณีนี้ไม่สามารถใช้สมการของเนินสต์คำนวณได้เพราะค่า  $n$  จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะต้องคำนวณโดยใช้ค่าพลังงานอิสระของกิบส์



จาก  $\Delta G^0 = \Delta G^0_{\text{ผลิตภัณฑ์}} - \Delta G^0_{\text{สารตั้งต้น}}$

จะได้ว่า  $\Delta G^0 = \Delta G^0_{\text{Fe}(\text{OH})_3} + 3\Delta G^0_{\text{H}^+} - \Delta G^0_{\text{Fe}^{3+}} - 3\Delta G^0_{\text{H}_2\text{O}}$

จากตาราง ก.2 สามารถหาค่า  $\Delta G^0$  ของสารต่าง ๆ ได้ดังนี้

$\Delta G^0_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = -696.6$  กิโลจูลต่อโมล

$\Delta G^0_{\text{H}^+} = 0$  กิโลจูลต่อโมล

$\Delta G^0_{\text{Fe}^{3+}} = -4.6$  กิโลจูลต่อโมล

$\Delta G^0_{\text{H}_2\text{O}} = -237.18$  กิโลจูลต่อโมล

เพราะฉะนั้นจะได้

$\Delta G^0 = -696.6 + 3(0) - (-4.6) - 3(-237.18)$  กิโลจูลต่อโมล

$= 19.534$  กิโลจูลต่อโมล

$= 19,534$  จูลต่อโมล

จากสมการ (3.6)

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{eq}$$

แทนค่าจะได้

$$19,534 = -(8.314)(25+273)(2.3) \log \left[ \frac{(a_{\text{H}^+})^3}{a_{\text{Fe}^{3+}}} \right]$$

$$3.4278 = \log a_{\text{Fe}^{3+}} + 3 \text{ pH}$$

เมื่อ  $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$  และ  $[\text{H}^+] = a_{\text{H}^+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ  $a_{Fe^{3+}} = 1$  ดังนั้นจะได้

$$pH = 1.1426$$

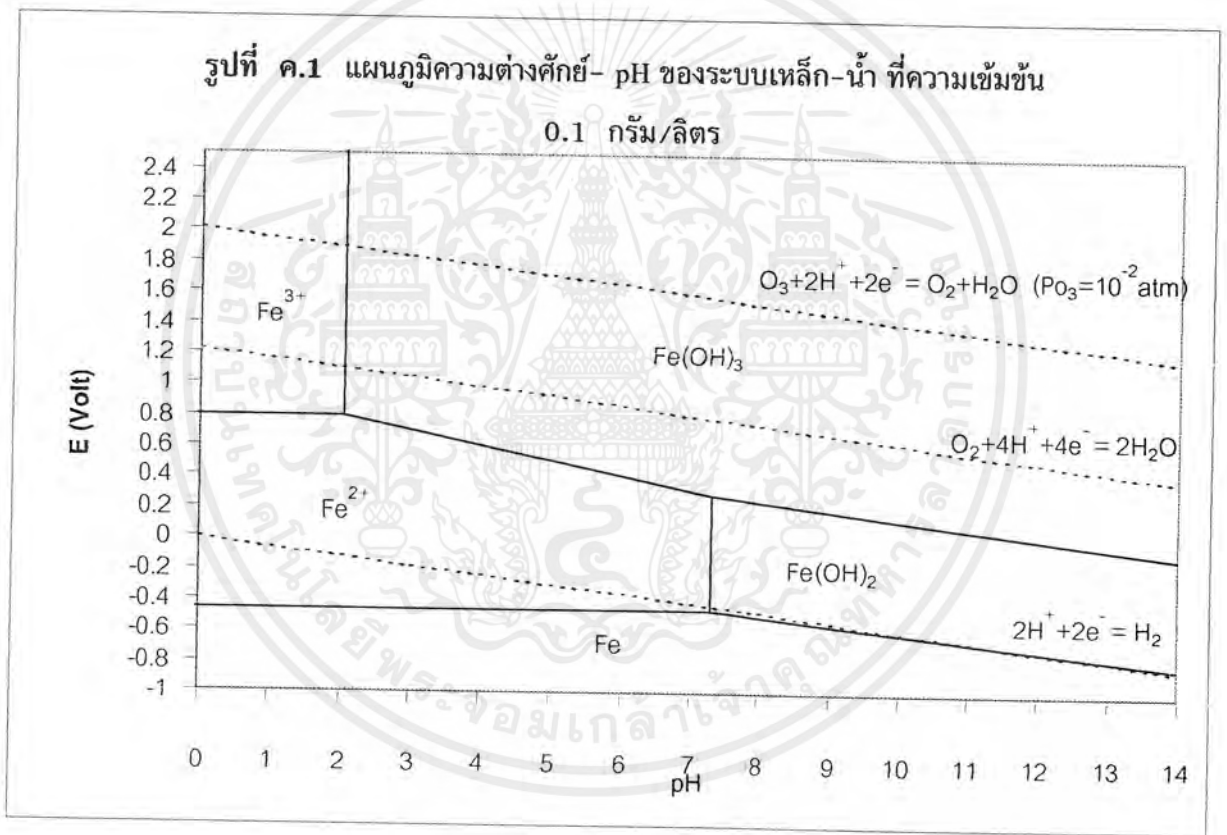
เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.1

สำหรับระบบอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันนี้ ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก ตาราง ก.3 เช่นเดียวกัน



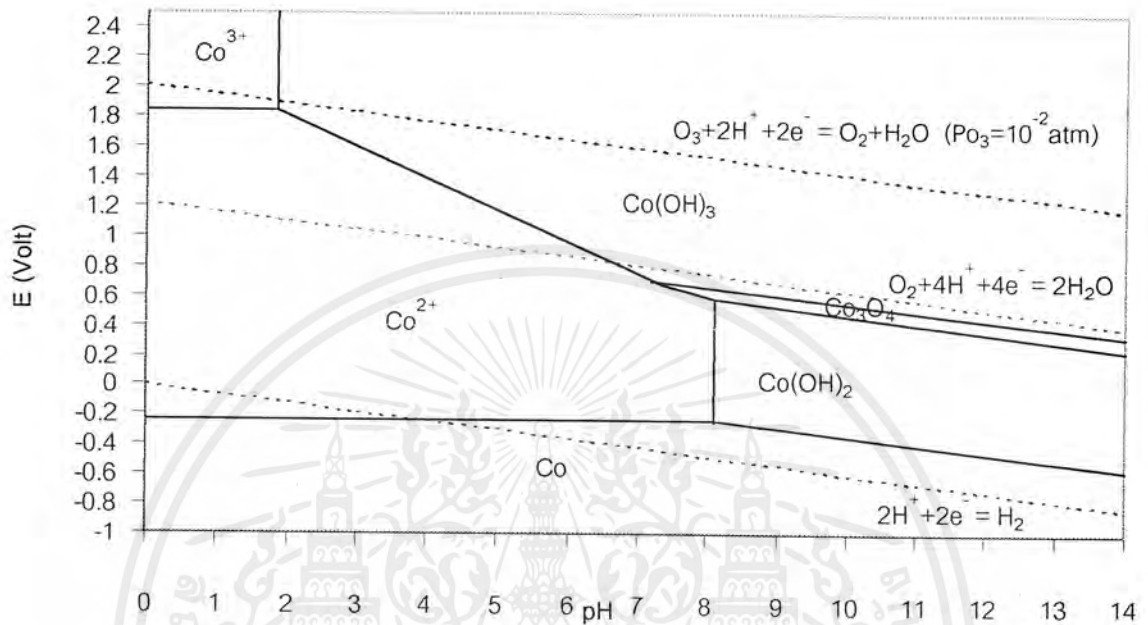
## ภาคผนวก ค

**แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบเหล็ก-น้ำ ระบบโคบอลต์-น้ำ และระบบนิกเกิล-น้ำ  
โดยมีความเข้มข้นของสารละลาย 0.1 กรัม/ลิตร**

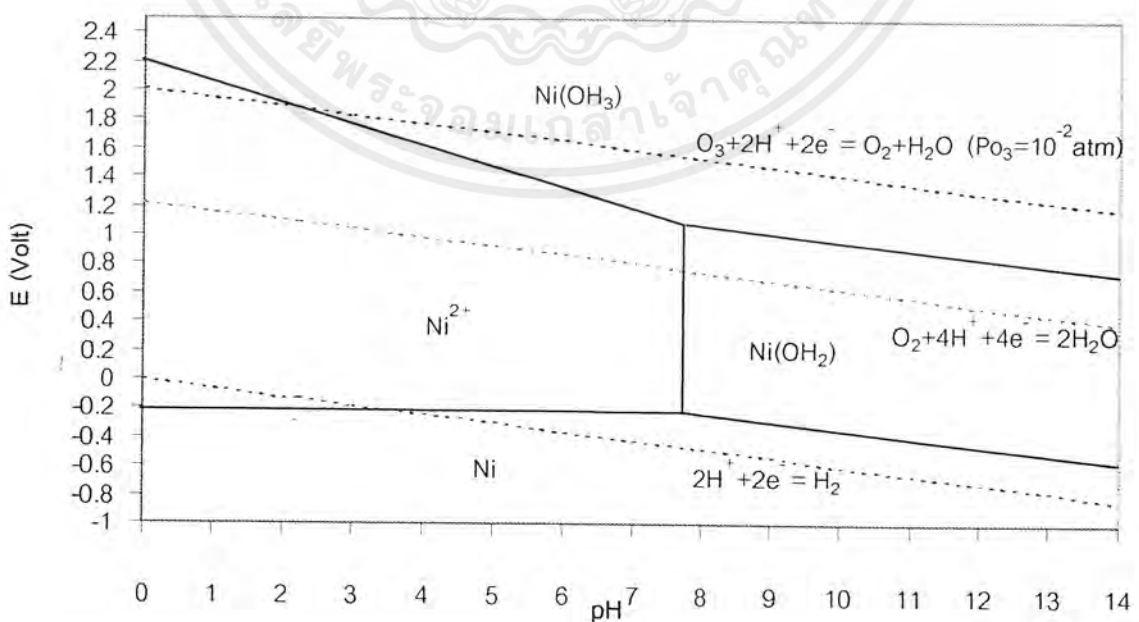


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.2 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบโคบอลต์-น้ำ ที่ความเข้มข้น  
0.1 กรัม/ลิตร



รูปที่ ค.3 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบนิกเกิล-น้ำ ที่ความเข้มข้น  
0.1 กรัม/ลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของเหล็ก (ppm)								
	pH 3			pH 4			pH 5		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	100.1	99.2	99.8	98.2	99.1	99.4	100.1	98.9	99.5
10	96.8	97.3	98.1	84.9	84.3	87.3	82.9	84.9	85.7
20	88.2	87.6	89.7	73.8	71.1	75.6	72.8	71.1	75.4
30	75.1	74.9	77.1	62.9	61.5	57.7	56.5	57.9	58.1
40	72.0	73.5	70.8	51.7	53.6	50.7	40.2	43.1	44.8
50	65.5	66.4	65.2	40.9	41.8	40.9	25.8	25.6	30.5
60	62.1	63.3	64.5	35.7	36.1	38.6	15.1	18.9	14.3
70	54.9	53.8	54.5	28.8	27.6	31.5	7.7	9.2	9.2
80	52.1	50.4	48.7	23.9	24.1	21.0	5.6	4.8	1.9
90	40.3	39.9	42.2	20.6	21.2	22.1	1.9	1.3	0.1

ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นของโคบอลต์ที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของโคบอลต์ (ppm)								
	pH 3			pH 4			pH 5		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	100.8	99.8	99.7	100.2	100.8	99.9	100.0	99.9	102.2
10	100.6	100.1	99.3	99.9	100.4	100.6	99.7	100.6	101.5
20	100.4	100.3	98.7	98.7	100.1	101.8	100.4	100.1	101.6
30	100.1	99.9	100.3	100.5	100.2	99.6	98.9	100.5	102.7
40	99.8	100.8	98.5	99.8	99.9	100.9	100.1	100.3	101.7
50	99.9	99.8	99.7	100.1	100.1	100.1	100.6	100.1	99.6
60	100.5	100.2	99.3	100.8	101.1	97.5	100.5	99.6	100.5
70	100.1	99.8	99.2	98.9	100.5	100.9	99.5	100.8	100.0
80	99.8	99.9	100.0	98.8	101.2	99.7	100.3	100.4	100.8
90	100.6	100.1	98.7	99.8	100.3	100.2	99.9	100.5	101.4

ตารางที่ ง.2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของโคบอลต์ (ppm)								
	pH 6			pH 7			pH 8		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	100.8	100.1	99.4	99.6	100.2	100.8	100.8	99.6	99.9
10	99.5	99.9	100.0	96.5	97.1	101.9	96.5	93.8	91.7
20	99.3	99.8	99.7	96.0	96.9	92.1	88.1	88.9	92.4
30	97.1	97.0	95.4	93.9	94.4	89.2	85.0	84.2	87.6
40	93.6	94.8	93.9	90.8	89.6	94.7	82.1	81.9	76.0
50	92.9	93.5	89.9	89.3	89.0	94.7	77.8	79.1	72.3
60	90.6	89.9	95.2	90.8	88.7	91.4	73.4	74.1	65.5
70	88.5	89.0	89.5	87.2	89.1	88.0	65.2	66.8	62.7
80	84.6	85.1	89.8	83.1	86.5	83.0	60.3	61.5	62.1
90	82.5	83.9	85.9	80.5	81.0	75.8	55.8	58.1	57.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของนิกเกิล (ppm)								
	pH 3			pH 4			pH 5		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	100.8	99.8	100.0	100.5	99.5	101.8	100.1	100.8	99.4
10	100.1	100.5	99.7	101.2	99.9	100.1	100.6	100.6	100.3
20	100.8	100.1	100.0	100.3	100.8	100.1	100.4	99.3	101.5
30	99.7	98.2	102.7	99.9	99.8	100.0	99.8	99.8	101.6
40	100.3	99.4	99.7	100.6	100.2	99.5	100.7	100.2	99.4
50	100.9	100.6	98.8	100.1	100.7	100.7	101.5	99.7	99.7
60	99.6	101.1	98.4	100.8	100.3	100.7	100.9	100.2	99.2
70	100.5	100.7	98.2	99.7	99.6	101.0	100.6	100.6	99.7
80	100.6	100.8	98.9	100.1	100.5	99.7	99.5	99.8	101.6
90	99.5	100.3	100.8	98.5	100.9	101.2	100.1	100.4	99.5

ตารางที่ ง.3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของนิกเกิล (ppm)								
	pH 6			pH 7			pH 8		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	99.9	100.6	100.4	100.0	99.1	102.4	100.7	99.7	99.9
10	100.1	100.8	100.9	97.3	100.8	98.3	101.2	99.3	96.2
20	100.2	100.5	100.2	96.9	97.8	97.8	98.7	98.1	97.5
30	99.8	99.9	100.6	96.2	95.3	98.3	95.0	97.8	96.4
40	99.6	100.3	99.8	95.4	95.1	98.1	93.9	96.6	95.1
50	100.4	100.8	98.2	94.9	95.1	97.4	91.0	94.2	95.0
60	98.2	100.1	101.7	93.1	94.8	97.1	91.2	91.8	93.3
70	100.0	100.5	100.4	94.6	94.5	95.3	94.1	88.2	89.5
80	100.6	100.1	99.6	95.2	94.9	93.7	88.5	85.1	88.9
90	98.2	101.2	101.2	93.8	93.1	95.4	82.7	81.9	86.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### การหาปริมาณธาตุโดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรี

#### หลักการ

อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรี เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ในปริมาณน้อย ๆ (Trace analysis) ได้สะดวกรวดเร็ว ให้ความถูกต้องและแม่นยำสูงในการวิเคราะห์ เทคนิคนี้ใช้หลักการดูดกลืนแสงของอะตอมอิสระที่เป็นไอ (Vapor state) ที่อยู่ในสถานะพื้น (Ground state)

เฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรีเป็นเทคนิคหนึ่งของอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรีที่ใช้เปลวไฟเพื่อผลิตอะตอมอิสระ เมื่อพันธสารละลายให้เป็นละอองน้ำเล็ก ๆ เข้าไปในเปลวไฟ ตัวทำละลายจะระเหยออกไปเหลือแต่เกลือ ซึ่งจะถูกทำให้กลายเป็นไอและแตกตัวเป็นอะตอมอิสระในสถานะแก๊สตามลำดับ อะตอมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะพื้น จากสมการของโบลซ์มาน (Boltzman)

$$\frac{N_e}{N_0} = \frac{g_e}{g_0} e^{-(E_e - E_0)/kT} \quad (1)$$

- เมื่อ  $N_e$  และ  $N_0$  = จำนวนอะตอมที่สถานะเร้าและสถานะพื้นตามลำดับ  
 $g_e$  และ  $g_0$  = น้ำหนักทางสถิติของสถานะเร้าและสถานะพื้นตามลำดับ  
 $E_e$  และ  $E_0$  = พลังงานที่สถานะเร้าและสถานะพื้นตามลำดับ  
 $k$  = ค่าคงที่ของโบลซ์มาน ( $1.3805 \times 10^{-16}$  เอิร์ก/เคลวิน)  
 $T$  = อุณหภูมิ

เช่น  $N_e/N_0$  ของ Na เท่ากับ  $9.9 \times 10^{-6}$  ที่ความยาวคลื่น 598.0 nm และอุณหภูมิ 2000 เคลวิน อะตอมสามารถถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้า (Excited state) ได้โดยการดูดกลืนแสงจากแหล่งแสงที่ให้สเปกตรัมคายแสงของธาตุที่เป็นชนิดเดียวกันกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



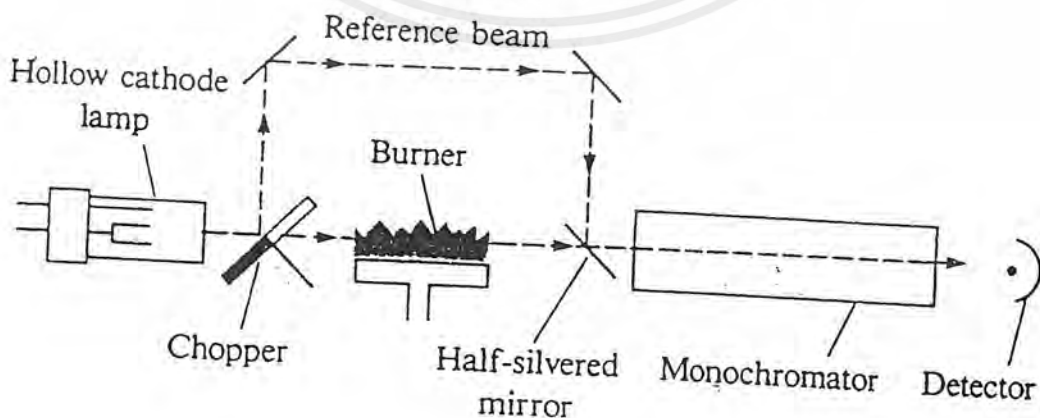
เมื่อ  $A$  = อะตอมอิสระที่สถานะพื้น  
 $A^*$  = อะตอมอิสระที่สถานะเร้า  
 $h\nu$  = พลังงานที่อะตอมดูดกลืน

เมื่อแสงจากแหล่งแสงถูกดูดกลืนโดยอะตอม ความเข้มแสงจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอะตอมที่ถูกดูดกลืนแสง หรือกล่าวได้ว่าความเข้มของแสงที่ลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายตามกฎของเบียร์

$$\log \frac{I_0}{I} = \epsilon b C \quad (3)$$

เมื่อ  $I_0$  = ความเข้มแสงก่อนถูกดูดกลืนโดยอะตอม  
 $I$  = ความเข้มแสงหลังถูกดูดกลืนโดยอะตอม  
 $\epsilon$  = ค่าการดูดซึมแสงเชิงโมล  
 $b$  = ความยาวของอะตอมเซลล์  
 $C$  = ความเข้มข้นของสารละลาย

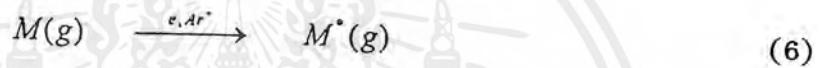
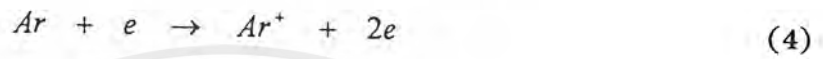
เครื่องมือที่ใช้วัดการดูดกลืนแสงของอะตอมเรียกว่า เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบดังรูปที่ จ.1



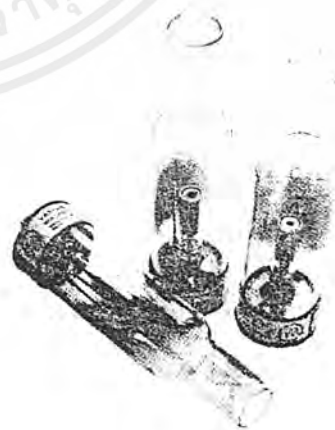
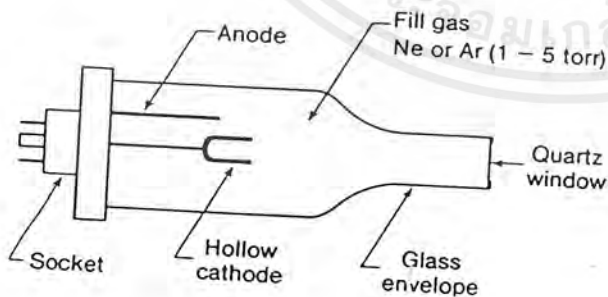
รูปที่ จ.1 ส่วนประกอบของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งแสงที่เลือกใช้ต้องให้แถบสเปกตรัมแคบ ๆ และมีความเข้มข้นคงที่ ได้แก่หลอดแคโทด (Hollow cathode lamp) ดังแสดงในรูปที่ จ.2 เป็นแหล่งแสงที่นิยมใช้กันมาก ประกอบด้วยแคโทดที่ทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ภายในหลอดบรรจุแก๊สเฉื่อยที่มีความดันต่ำ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว แก๊สจะถูกทำให้แตกตัวและถูกเร่งเข้าชนขั้วแคโทด ทำให้อะตอมหลุดออกมาแล้วถูกกระตุ้น ปล่อยแสงออกมาตามลำดับดังนี้



เมื่อ Ar และ M คือแก๊สเฉื่อยตามลำดับ



รูปที่ จ.2 ลักษณะของหลอดแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การเกิดสารประกอบที่สลายตัวได้ยากทำให้การดูดกลืนแสงลดลง

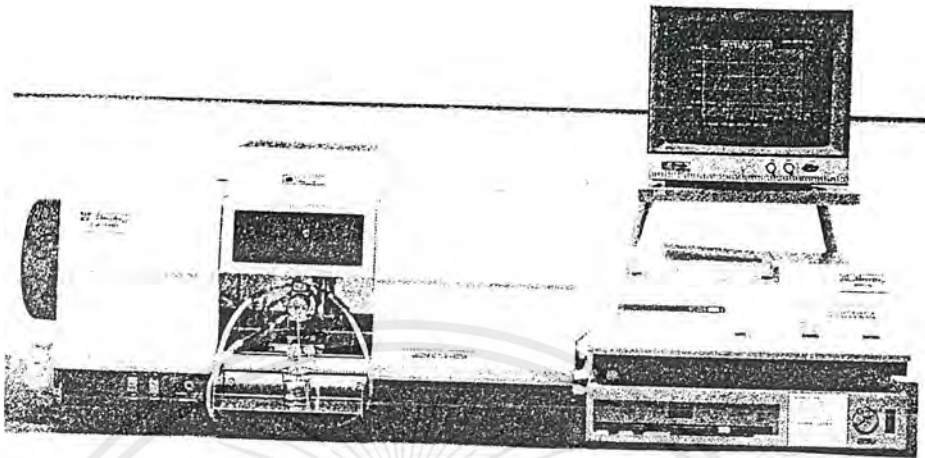
การดูดกลืนแสงของสปีชีส์อื่น ๆ ที่ไม่ใช่อะตอมที่สนใจเรียกว่า การดูดกลืนพื้นหลัง (Background absorption) การแก้ไขการดูดกลืนพื้นหลังวิธีหนึ่งก็คือ การใช้หลอดแคโทดวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม และพื้นหลัง และใช้หลอด  $D_2$  วัดการดูดกลืนแสงของพื้นหลัง เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของพื้นหลังไปลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงทั้งหมดจะได้ค่าการดูดกลืนแสงของอะตอมเพียงอย่างเดียว และพบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจะให้การดูดกลืนพื้นหลังมาก

ดังนั้นในการทำการวิเคราะห์จำเป็นต้องตั้งสภาวะของเครื่องมือให้เหมาะสมก่อนใช้งาน และควรแก้ไขค่าการดูดกลืนแสงให้ถูกต้อง เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากที่สุด

เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ จ.3

ประโยชน์ของอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรีที่ใช้ในงานวิเคราะห์ทางเคมี

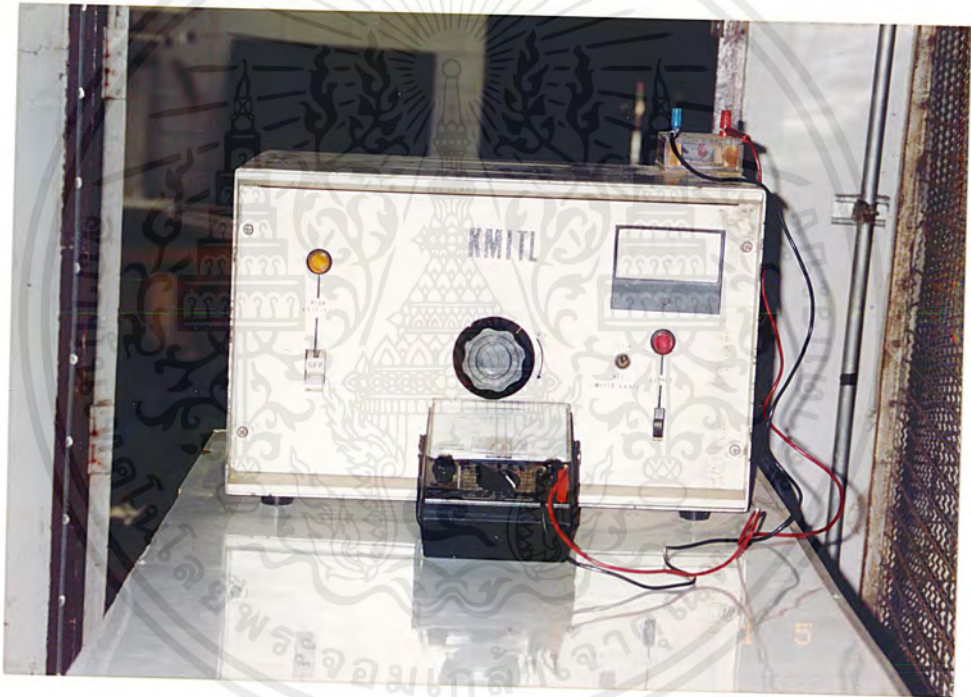
1. ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อการเกษตร เช่น การวิเคราะห์ดิน พืช และปุ๋ย เป็นต้น
2. ใช้ในงานวิเคราะห์เพื่อการแพทย์และชีวเคมี เช่น การหาปริมาณของธาตุ Ca, Mg, Cu, Pb, Na, K, Fe, Zn, As และอื่น ๆ ในเลือด ปัสสาวะ และเนื้อเยื่อ เป็นต้น
3. ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อการโลหวิทยา เช่น การวิเคราะห์โลหะผสมต่าง ๆ หาปริมาณของสารเจือปนต่าง ๆ ในโลหะบริสุทธิ์ เป็นต้น
4. ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันและการปิโตรเลียม เช่น การองค์ประกอบที่เป็นโลหะของน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเครื่อง น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น
5. ใช้ในงานวิเคราะห์แร่และวัสดุต่าง ๆ
6. ใช้ในงานวิเคราะห์น้ำจากแหล่งต่าง ๆ เช่น น้ำบาดาล น้ำเสีย
7. ใช้ในงานวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม
8. ใช้ในงานวิเคราะห์ทางอาหารและยา
9. ใช้ในงานวิเคราะห์ธาตุในสารอื่น ๆ



รูปที่ จ.3 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิด เพลม โมเดล AA-680 ผลิตโดยบริษัทชิมิดซู เป็นเครื่องที่สามารถเลือกใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ดีที่สุดได้โดยอัตโนมัติในการปริมาณของธาตุได้ถึง 61 ธาตุ โดยผ่านแป้นพิมพ์ มีระบบควบคุมความปลอดภัยของแก๊ส ใช้จอสี CRT 14 นิ้ว แสดงข้อมูลต่าง ๆ และสามารถต่อเข้ากับเครื่องดูสารตัวอย่างอัตโนมัติ และเตาอะตอมไมเซอร์ชนิดแกรไฟท์

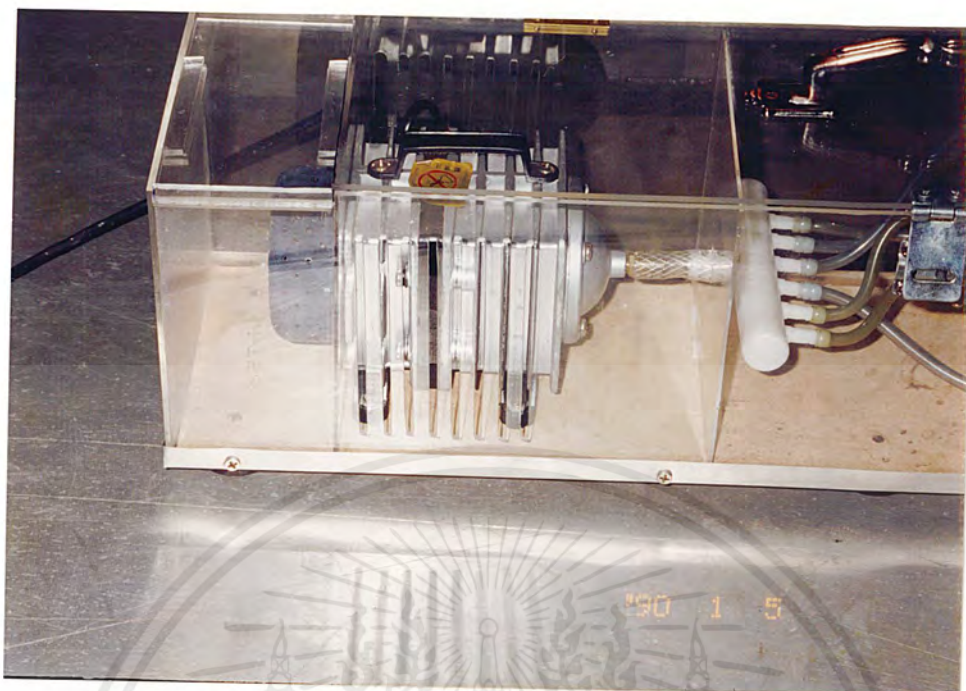
## ภาคผนวก จ

### รูปภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

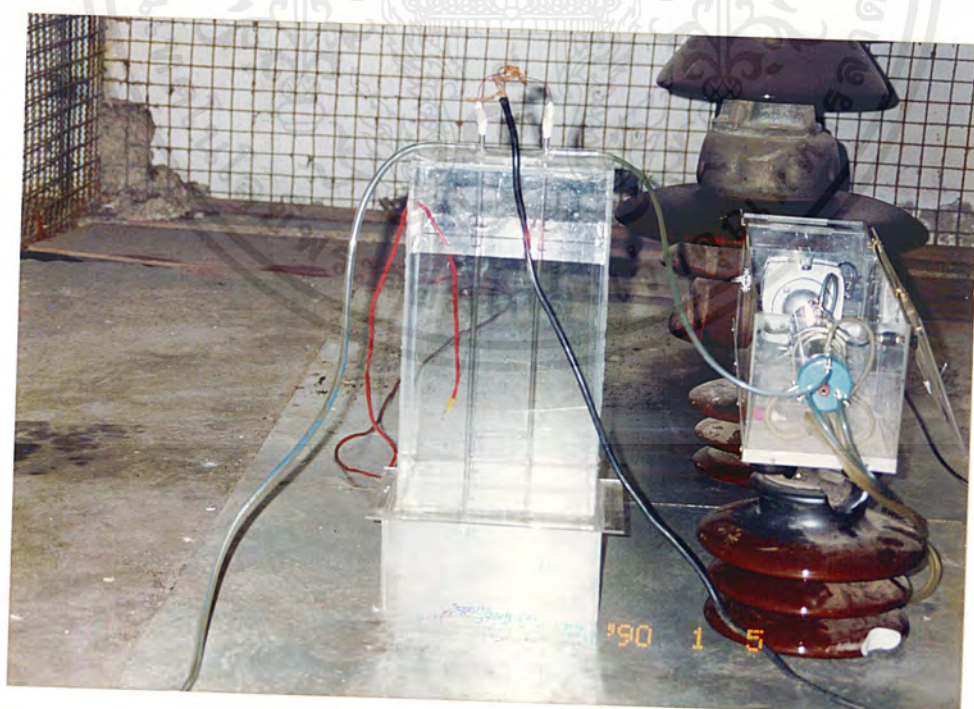


รูปที่ จ.1 เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

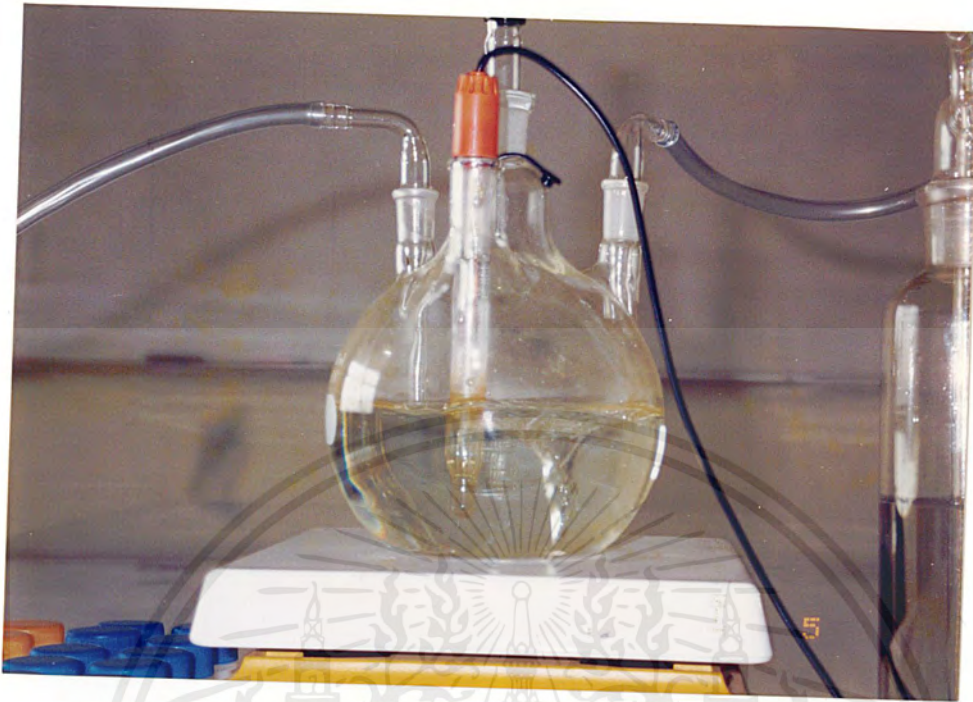


รูปที่ จ.2 ป้อนอากาศ

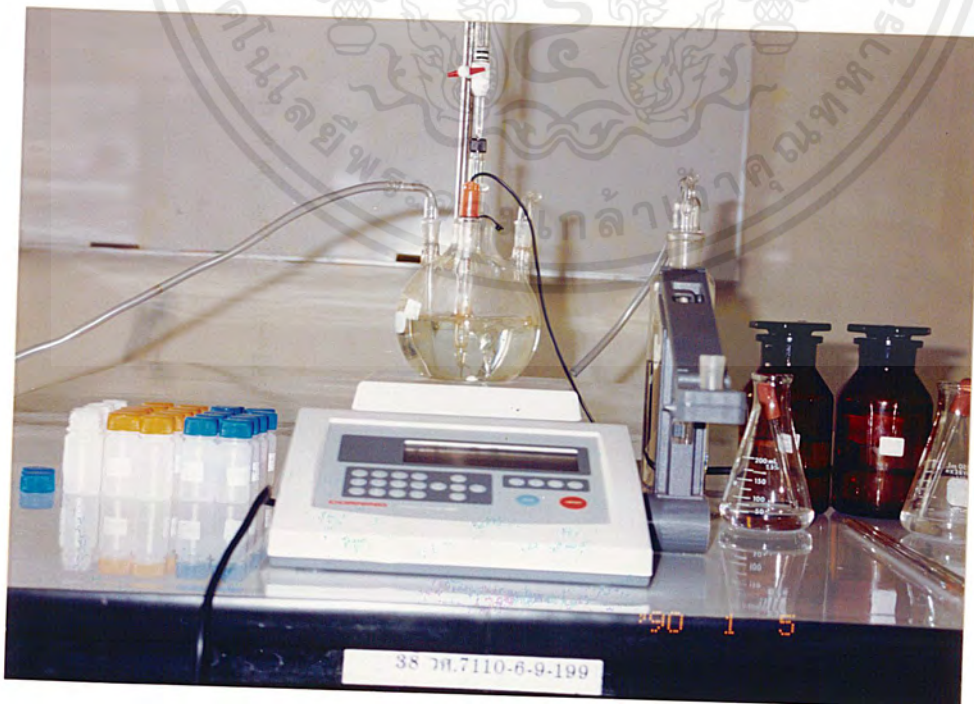


รูปที่ จ.3 เครื่องสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.4 เครื่องเติมไอโซน



รูปที่ ฉ.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้