สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การแยกตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสียด้วยวิธีโอโซเนชั่น

T050254

นที ตั้งอมรสุขสันต์

ยินดี สุทธิสวาท

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 50254
วัน,เดือน,ปี 28 เม.ย. 2547

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRECIPITATION LEAD AND CADMIUM FROM WASTEWATER BY OZONATION

Natee Tang-amornsuksan
Yindee Suttisawat

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
2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การแยกตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสียด้วยวิธีโอโซเนชั่น

โดย นาย นที ตั้งอมรสุขสันต์
นางสาว ยินดี สุทธิสวาท
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. โจโกะ เทเรซ่า อิโต้
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.โจโกะ เทเรซ่า อิโต้)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การแยกตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสียด้วยวิธีโอโซเนชั่น
โดย นาย นที ตั้งอมรสุขสันต์
นางสาว ยินดี สุทธิสวาท
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. โจโกะ เทเรซ่า อิโต้
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมการถลุงแร่สังกะสีจากธรรมชาติมักจะมีสารประเภทโลหะหนักปนเปื้อน ได้แก่ตะกั่วและแคดเมียม ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สำหรับการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ในโครงงานนี้ได้ทำการบำบัดโดยวิธีโอโซเนชั่น โดยการออกซิไดซ์สารละลายโลหะหนักด้วยโอโซนให้ตกตะกอนอยู่ในรูป MO_2 วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถตกตะกอนโลหะหนักต่างๆออกจากกันได้โดยใช้แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของโลหะหนักแต่ละชนิดในการพิจารณาค่า pH ที่เหมาะสม อีกทั้งโลหะหนักดังกล่าวยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และโอโซนก็ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในน้ำ

โครงงานนี้ได้ทำการทดลองเติมโอโซนในปริมาณ 0.5 กรัมต่อชั่วโมงลงในสารละลายตะกั่ว 0.1 กรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า สามารถตกตะกอนตะกั่วออกมาในรูปของ PbO_2 ได้ทั้งหมดที่ pH 5.0 โดยใช้เวลา 70 นาที คำนวณหาค่าอันดับของปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราเร็วได้เท่ากับ -0.2261 และ 5.79×10^{-7} โมล$^{(1.2261)}$.ลิตร$^{(-1.2261)}$.นาที$^{-1}$ ตามลำดับ และสามารถแยกตะกั่วทั้งหมดออกจากแคดเมียมที่ pH 5.0 ใช้เวลา 85 นาที ส่วนแคดเมียมพบว่าไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ให้ตกตะกอนได้ด้วยโอโซน จึงทำการตกตะกอนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ $Cd(OH)_2$ โดยใช้สารละลายเบสที่ pH มากกว่า 8.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title PRECIPITATION LEAD AND CADMIUM FROM WASTEWATER BY OZONATION

By Mr. Natee Tang-amornsuksan

Ms. Yindee Suttisawat

Advisor Dr. Choko Tereza Ito

Co-Advisor Assist.Prof.Dr.Paisal Nakpipat

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering Faculty of Engineering.

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

Wastewater from Zinc extraction process contains heavy metals such as lead and cadmium that are dangerous to living organisms. For treatment of such wastewater, it is possible to use ozone as oxidizer to make them precipitate as MO_2 . This method has advantages in that it is possible to precipitate heavy metal individually by using Potential-pH diagram for each heavy metals so that heavy metal can be recovered from wastewater for reuse and ozone will not contaminate water.

In this project, ozonation experiments were performed for lead and cadmium by injecting 0.5 g/hr of ozone in solution containing 0.1 g/l of each metal. From the experiment was found that lead could be completely recovered from lead solution as PbO_2 at pH 5.0 in 70 minute and could be separated clearly from cadmium at pH 5.0 by using time 85 minute .The reaction order and reaction rate constant for lead oxidation-precipitation reaction were -0.2261 and 5.79×10^{-7} $mol^{(1.2261)}.liter^{(-1.2261)}.min^{-1}$, respectively .In case of cadmium was found that it is not oxidized by ozone so it was precipitated in form of $Cd(OH)_2$ by using sodiumhydroxide at pH more than 8.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ได้รับความช่วยเหลือจาก ดร. โจโกะ เทเรซ่า อิโต้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน และ ผศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงงานซึ่งให้คำแนะนำและคำปรึกษาในขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆมาเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังมีหน่วยงานและบุคลากรอีกหลายท่านที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและอยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้ ดังรายนามต่อไปนี้

ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตะกอนสารด้วยเครื่อง X-ray diffractrometer

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องอะตอมมิกส์แอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

คุณ สุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำและสอนการใช้เครื่องอะตอมมิกส์แอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค) ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตะกอนสารด้วยเครื่อง X-ray diffractrometer

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการทำโครงงานครั้งนี้

ยินดี สุทธิสวาท
นที ตั้งอมรสุขสันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญตาราง..... ฉ
สารบัญรูปภาพ..... ช
รายการสัญลักษณ์..... ซ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมา..... 2
1.2 จุดประสงค์ของโครงงาน..... 2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน..... 2
1.4 ขั้นตอนการทำงาน..... 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
บทที่ 2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน..... 4
2.1 แอกติวิตีและแอกติวิตีโคเอฟฟีเชียน..... 4
2.2 สมการของเนิสต์..... 6
2.3 แผนภูมิความต่างศักย์ - pH..... 7
บทที่ 3 การดำเนินงาน..... 11
3.1 การหาปริมาณแก๊สโอโซนจากเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน..... 11
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง..... 14
3.3 การออกซิไดซ์ตะกั่วด้วยโอโซน..... 14
3.4 การตกตะกอนแคดเมียมโดยใช้สารละลายเบส..... 18
3.5 การแยกตะกอนของโลหะผสมระหว่างแคดเมียมกับตะกั่วที่ pH ที่เหมาะสม..... 19
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 22
4.1 ผลการทดลอง..... 22
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง..... 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 36
5.1 สรุปผลการทดลอง 36
5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง 37
เอกสารอ้างอิง 38
ภาคผนวก 39
ผนวก ก 40
ผนวก ข 43
ผนวก ค 45
ผนวก ง 49
ผนวก จ 51
ผนวก ฉ 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบ ตะกั่ว – น้ำ ที่อุณหภูมิ 25°C 7

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบ แคดเมียม – น้ำ ที่อุณหภูมิ 25°C 9

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ที่ใช้ในการไทเทรต และปริมาณของโอโซนที่สังเคราะห์ได้ 22

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 4.0 23

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 4.5 24

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 4.7 25

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 5.0 26

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 5.1 27

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 7.0 28

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของตะกั่วกับแคดเมียมที่เหลือในสารละลายผสม ณ เวลาต่างๆที่ pH 5.0 28

ตารางที่ 4.9 ค่า log V ที่ pH 4.0, 4.7, 4.5, 5.0 สำหรับตะกั่ว 34

ตารางที่ 4.10 ค่าอันดับและค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยาสำหรับตะกั่ว 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบตะกั่ว-น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร.....8
รูปที่ 2.2 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบ แคดเมียม- น้ำ..... 10
ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร
รูปที่ 3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาปริมาณแก๊สโอโซน.....13
จากเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน
รูปที่ 3.2 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกซิไดซ์ตะกั่วด้วยโอโซน..... 17
รูปที่ 3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตกตะกอนแคดเมียมด้วยเบส..... 19
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจน.....23
กับความดันย่อยของโอโซน
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับเวลาที่ค่า pH ต่างๆ..... 30
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมกับเวลาที่ค่า pH 7.0 31
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมกับเวลา.....32
ต่างๆที่ค่า pH 5.0
รูปที่ 4.5 แนวโน้มของกราฟ รูปที่ 4.2 ในลักษณะเชิงเส้นที่ค่า pH ต่างๆ..... 33
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง log V กับ pH ของตะกั่ว..... 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

a	ความว่องไวของสาร [-]
C	ความเข้มข้น [โมล/ลิตร]
C^0	ความเข้มข้นที่สภาวะมาตรฐาน [โมล/ลิตร]
E	ความต่างศักย์ [โวลต์]
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ [96,458 คูลอมบ์/โมล]
k	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา [โมล$^{(1-n)}$. ลิตร$^{(n-1)}$. นาที$^{-1}$]
k_0	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา [โมล$^{(1-m-n)}$.ลิตร$^{(m+n-1)}$.นาที$^{-1}$]
m, n	อันดับของปฏิกิริยา [-]
n	จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในครึ่งปฏิกิริยา [-]
O_3	ความเข้มข้นของโอโซน [มิลลิกรัม/ลิตร]
P_{o_3}	ความดันย่อยของโอโซน [atm]
R	ค่าคงตัวของแก๊ส [แคลอรี่/โมล-เคลวินล
T	อุณหภูมิ [เคลวิน]
t	เวลา [นาที]
V	อัตราของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย [โมล/ลิตร-นาที]

อักษรกรีก

ΔG	พลังงานอิสระ [กิโลจูล/โมล]
α, β, γ และ δ	สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารชนิดต่างๆ [-]
γ_0	ค่าสัมประสิทธิ์ความว่องไว [-]
μ	ค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี [-]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

อุตสาหกรรมการถลุงแร่สังกะสีจากธรรมชาติคือการนำแร่สังกะสีซัลไฟต์หรือที่เรียกว่า Zine หรือ Sphalerite มาเผากับออกซิเจนให้เป็นสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีก่อน แล้วจึงนำออกไซด์ของสังกะสีมาเผารวมกับถ่านโค้ก ซึ่งเป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูง โดยคาร์บอนจะดึงออกซิเจนมารวมกับตัวเอง แล้วเกิดเป็นสารบริสุทธิ์ คือ สังกะสี ดังสมการ

ซิงค์ออกไซด์ + คาร์บอน ⟶ สังกะสี + คาร์บอนไดออกไซด์

การทำให้สังกะสีบริสุทธิ์นั้น ทำได้โดยการทำอิเล็กโตรไลต์ คือการแยกสารด้วยไฟฟ้า โดยจะได้โลหะสังกะสีที่ขั้วลบ [1] ส่วนสิ่งเจือปนจะละลายอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีแคดเมียมและตะกั่วปนเปื้อน ซึ่งสารทั้งสองอย่างนี้เป็นสารพิษที่ทำให้เกิดมลพิษที่รุนแรง ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียนี้ลงสู่แม่น้ำจะต้องมีการกำจัดสารทั้งสองชนิดนี้ออกก่อน การกำจัดสารดังกล่าวด้วยวิธีโอโซเนชันก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียในรูปของโลหะออกไซด์ที่ใช้ pH ต่ำกว่าวิธีอื่น เช่นการทำให้ตกตะกอนอยู่ในรูปของด่าง(OH^-) ซึ่งเมื่อเรามีโลหะหลายๆชนิดรวมกันโลหะเหล่านั้นจะตกตะกอนรวมกันอยู่ในรูปของ $M(OH)_2$ ทำให้ไม่สามารถแยกเอาตะกอนแต่ละชนิดออกมาได้ การออกซิไดซ์โลหะหนักเหล่านั้นก่อนแล้วตกตะกอนในรูปของออกไซด์จะทำให้สามารถแยกโลหะหนักออกเป็นโลหะออกไซด์แต่ละชนิดได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกออกซิไดซ์ได้ไม่เท่ากันนั่นเอง การใช้โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่จะตกตะกอนโลหะหนักจากสารละลายเพราะโอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงและไม่ก่อให้เกิดมลพิษกับน้ำ แต่เงื่อนไขในการเกิดออกไซด์ยังไม่เป็นที่เข้าใจกันมากนัก

โครงงานนี้เป็นการแยกตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยวิธีโอโซเนชัน โดยทำให้ตกตะกอนอยู่ในรูป PbO_2 ส่วนแคดเมียมไม่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนจึงทำให้เหลืออยู่ในสารละลาย โครงงานนี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการตกตะกอนรวมทั้งสภาวะในการตกตะกอนของตะกั่วและวิเคราะห์ตะกอนที่แยกได้ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer เพื่อตรวจสอบตะกอนที่ได้ว่าเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีจากแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์-pH (Potential – pH diagram) หรือไม่ รวมทั้งคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ตะกั่วด้วยโอโซน ส่วนแคดเมียมจะทำการตกตะกอนโดยใช้เบส แคดเมียมจะถูกตกตะกอนให้อยู่ในรูป $Cd(OH)_2$ โดยจะทำการศึกษาถึง pH ที่ใช้ในการตกตะกอนและพิสูจน์ว่าเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์- pH หรือไม่

1.2 จุดประสงค์โครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการแยกโลหะหนัก เช่น ตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสียโดยวิธีออกซิไดซ์ด้วยโอโซน

1.2.2 เพื่อศึกษาแผนภูมิความต่างศักย์ – pH ของระบบตะกั่ว-น้ำและระบบแคดเมียม- น้ำ

1.2.3 เพื่อศึกษา pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะตะกั่วด้วยโอโซน

1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีแยกตะกั่วและแคดเมียมออกจากกัน รวมทั้งศึกษาวิธีหาอัตราเร็วและอันดับของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตะกั่วด้วยโอโซน

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 ศึกษาหลักการออกซิเดชันตะกั่วด้วยโอโซน

1.3.2 ศึกษาและทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการแยกตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสีย

1.4 ขั้นตอนการทำงาน

1.4.1 ศึกษาหลักการออกซิเดชันและการตกตะกอนของตะกั่วและแคดเมียม

1.4.2 สร้างแผนภูมิความต่างศักย์ – pH ของระบบตะกั่ว-น้ำและแคดเมียม-น้ำ

1.4.3 ทดลองหาเงื่อนไขและสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตะกั่วที่ทำให้เกิดการตกตะกอนด้วยโอโซน

1.4.4 สรุปและรายงานผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจหลักการในการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโอโซน และสามารถแยกตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้ รวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาใช้แยกโลหะหนักชนิดอื่นๆได้ นอกจากนี้ผู้ดำเนินโครงงานยังได้รับประโยชน์ในด้านการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม การรู้จักการวางแผนและควบคุมการทำงานให้สำเร็จตามแผนงานที่ได้วางไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ความสมดุลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ pH และความรุนแรงของสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วละลายอยู่จะอาศัยหลักการของปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$Pb^{2+} + 2H_2O \longrightarrow PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \qquad (2.1)$$

ผลจากการถูกออกซิไดซ์ของตะกั่วจะได้เป็นตะกอนของตะกั่วออกไซด์ ส่วนสารละลายแคดเมียมนั้นไม่สามารถออกซิไดซ์ได้ ดังนั้นจะทำการตกตะกอนเป็นแคดเมียมไฮดรอกไซด์แทน ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$Cd^{2+} + 2H_2O \longrightarrow Cd(OH)_2 + 2H^+ \qquad (2.2)$$

การศึกษาความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ ต้องอาศัยค่าแอกติวิตี สมการของเนิสต์ (Nernst's equation) และค่าการละลาย (Solubility) ของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ นอกจากนั้นยังอาจตรวจสอบดูได้ว่าโลหะ ไอออน หรือสารประกอบที่เกิดจากการออกซิเดชันทางเคมีจะมีเสถียรภาพในสภาวะใดได้จากแผนภูมิของความต่างศักย์ – pH บางทีเรียกแผนภูมินี้ว่า แผนภูมิปูเบก์ (Pourbaix diagram) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไป

2.1 แอกติวิตีและแอกติวิตีโคเอฟฟิเชียน (activity and activity coefficient) [2]

พิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป ดังนี้

$$\alpha A + \beta B \longrightarrow \gamma C + \delta D \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปทางขวานั่นคือ

$$\Delta G = \Delta G^{o} + RT \ln \frac{a_C^{\gamma} a_D^{\delta}}{a_A^{\alpha} a_B^{\beta}} \qquad (2.4)$$

เมื่อ ΔG = พลังงานอิสระ, กิโลจูล/โมล

R = ค่าคงตัวของแก๊ส, แคลอรี/โมล – เคลวิน

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน

a_A, a_B, a_C และ a_D = แอกติวิตีของสาร A, B, C และ D ตามลำดับ

α, β, γ และ δ = สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสาร A, B, C และ D ตามลำดับ

ที่สภาวะสมดุล ΔG มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการที่ (2.4) เป็น

$$\Delta G^{o} = -RT \ln K_{eq} \qquad (2.5)$$

เมื่อ

$$K_{eq} = \frac{a_C^{\gamma} a_D^{\delta}}{a_A^{\alpha} a_B^{\beta}} \qquad (2.6)$$

จากสมการ (2.4) สำหรับแก๊สอุดมคติที่อยู่ในสภาวะมาตรฐานมีความดันไอย่อย (P^{o}) เท่ากับ 1 บาร์ ค่าแอกติวิตีจะเท่ากับ P/P^{o} สำหรับสารประกอบของสารละลายอุดมคติที่สภาวะมาตรฐานความเข้มข้น (C^{o}) เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ค่าแอกติวิตีจะเท่ากับ C/C^{o} ส่วนของแข็งและของเหลวบริสุทธิ์นั้นจะอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นค่าแอกติวิตีจะเท่ากับ 1 และสำหรับตัวทำละลายในสารละลายอุดมคติจะถูกสมมุติว่าเป็นของเหลวบริสุทธิ์ที่มีค่าแอกติวิตีเท่ากับ 1 เช่นกัน

การใช้สมการ (2.4), (2.5) และ (2.6) สำหรับการคำนวณในกรณีสารละลายผสมที่ไม่ประพฤติตัวเป็นสารละลายอุดมคติหรือแก๊สผสมที่ไม่ประพฤติตัวเป็นแก๊สอุดมคติจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (Activity coefficient, μ) เพื่อคำนวณค่าแอกติวิตีตามสมการที่ (2.7)

$$a = \mu \, C/C^{o} \qquad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ μ = ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (ไม่มีหน่วย)

C = ความเข้มข้น, โมล/ลิตร

C^o = ความเข้มข้นที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 1 โมล/ลิตร

เนื่องจาก $C^o = 1$ โมล/ลิตร ทำให้ค่าแอกติวิตีมีค่าเท่ากับ μC แต่ต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าแอกติวิตีจะต้องไม่มีหน่วยไม่ว่าจะคำนวณโดยใช้ความเข้มข้นหรือความดันย่อยก็ตาม

2.2 สมการของเนิสต์ (Nernst's equation)

จากงานทางไฟฟ้าที่ทำโดยเซลล์กัลวานิกจะมีค่าเท่ากับความต่างศักย์คูณด้วยประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทที่ขั้วไฟฟ้าใดๆ สำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน n โมล ประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทก็คือ nF ดังนั้นงานทางไฟฟ้าในหน่วยจูลเท่ากับ nFE ปริมาณงานสูงสุดที่ทำโดยเซลล์กัลวานิกคือค่าของ nFE ภายใต้เงื่อนไขที่กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้าผันกลับได้ เนื่องจากงานทางไฟฟ้าเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งของงานนอกเหนือจากงานของการขยายตัวหรือหดตัวที่มีในเซลล์กัลวานิกแบบดั้งเดิม ตามหลักของพลังงานอิสระอาจกล่าวได้ว่า

$$\Delta G = -nFE \tag{2.8}$$

เมื่อ E = ความต่างศักย์, โวลต์

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในปฏิกิริยา

F = ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96,493 คูลอมบ์

ดังนั้นจากสมการที่ (2.4) จะได้

$$-nFE = \Delta G^o + RT \ln \frac{a_C^{\gamma} a_D^{\delta}}{a_A^{\alpha} a_B^{\beta}} \tag{2.9}$$

จากสมการที่ (2.6) จะได้

$$-nFE = \Delta G^o + RT \ln K_{eq} \tag{2.10}$$

ที่สภาวะมาตรฐาน

$$E^o = -\Delta G^o / nF \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่ากลับลงในสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln K_{eq} \qquad (2.12)$$

เรียกสมการที่ (2.12) ว่า สมการของเนิสต์

เมื่อรวมค่าคงที่เข้าด้วยกันและเปลี่ยนลอการิทึมธรรมชาติเป็นลอการิทึมฐานสิบ สมการที่ (2.12) สำหรับความต่างศักย์ (ในหน่วยโวลต์) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะกลายเป็น

$$E = E^0 - \frac{0.0591}{n} \log K_{eq} \qquad (2.13)$$

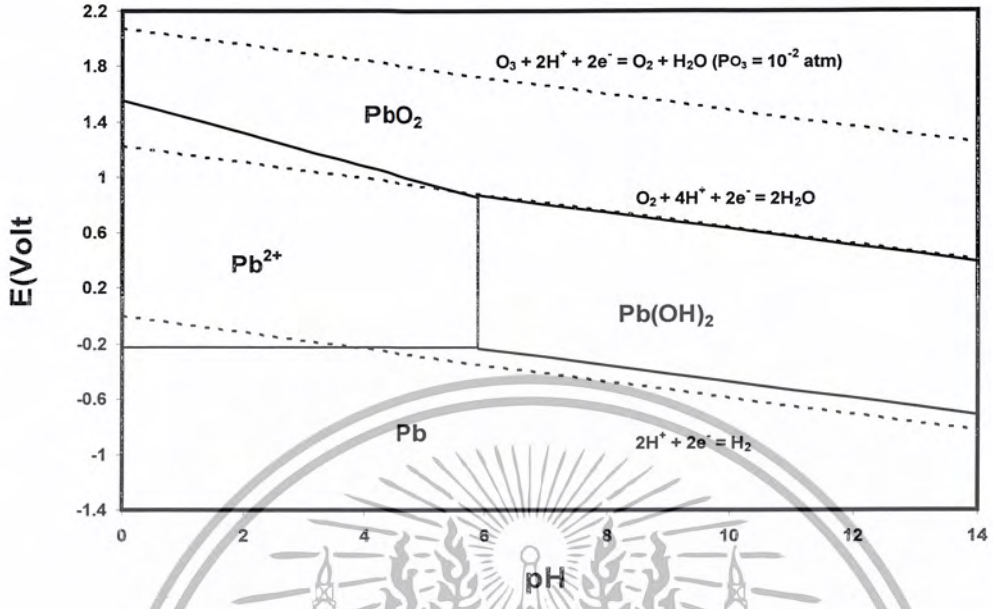
2.3 แผนภูมิความต่างศักย์ – pH [3]

การพิจารณาแผนภูมิความต่างศักย์ – pH นั้น จะใช้สมการของเนิสต์และสมการพลังงานอิสระของกิบส์ คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์และค่า pH ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับ pH ของระบบ แคดเมียม – น้ำ และ ตะกั่ว – น้ำ ที่อุณหภูมิ 25^oC สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบตะกั่ว – น้ำ ที่อุณหภูมิ 25^oC [3]

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E – pH
$Pb^{2+} + 2e^- = Pb$	$E = -0.126+0.0295\log a_{Pb^{2+}}$
$Pb(OH)_2 + 2H^+ = Pb^{2+} + 2H_2O$	$pH = 4.084-0.5\log a_{Pb^{2+}}$
$PbO_2 + 4H^+ + 2e^- = Pb^{2+} + 2H_2O$	$E = 1.457 - 0.1182(pH) - 0.02955\log a_{Pb^{2+}}$
$PbO_2 + 2H^+ + 2e^- = Pb(OH)_2$	$E = 1.217 - 0.0591(pH)$
$Pb(OH)_2 + 2H^+ + 2e^- = Pb + 2H_2O$	$E = 0.115 - 0.0591(pH)$
$2H^+ + 2e^- = H_2$	$E = -0.0591(pH) - 0.0295\log P_{H_2}$
$O_2 + 4H^+ + 2e^- = 2H_2O$	$E = 1.228 - 0.0591(pH) + 0.0148 \log P_{O_2}$
$O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{O_3} / P_{O_2}) - 0.0591pH$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบตะกั่ว-น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

ในแผนภูมิความต่างศักย์ – pH เส้นตรงที่ลากแต่ละเส้นจะแสดงเงื่อนไขของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารประกอบแต่ละชนิด ส่วนเส้นประในตำแหน่งบน กลาง และล่าง จะแสดงขีดจำกัดการละลายทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ $O_3 \longrightarrow O_2$, $O_2 \longrightarrow H_2O$ และ $H_2O \longrightarrow H_2$ ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. พื้นที่เหนือเส้น $O_3 \longrightarrow O_2$ หมายถึง สภาวะเสถียรของโอโซน
2. พื้นที่ระหว่างเส้น $O_3 \longrightarrow O_2$ และ $O_2 \longrightarrow H_2O$ หมายถึงสภาวะเสถียรของออกซิเจน
3. พื้นที่ระหว่างเส้น $O_2 \longrightarrow H_2O$ และ $H_2O \longrightarrow H_2$ หมายถึงสภาวะเสถียรของน้ำ
4. พื้นที่เหนือเส้น $H_2O \longrightarrow H_2$ หมายถึง สภาวะเสถียรของไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบตะกั่ว-น้ำ ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตรสามารถสรุปได้ดังนี้

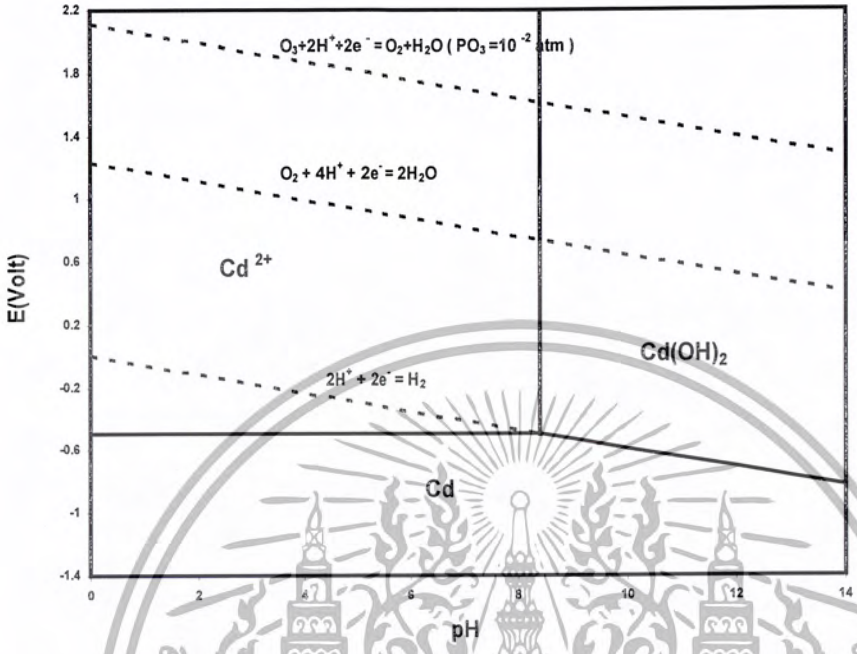
1. Pb^{2+} จะเสถียรภายใต้ pH ต่ำกว่า 5.8
2. การออกซิไดซ์ Pb^{2+} เป็น PbO_2 จะเกิดขึ้นระหว่าง pH 0-5.8
3. การออกซิไดซ์ Pb^{2+} ด้วยโอโซนสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$Pb^{2+}(aq) + O_3(g) + H_2O(l) \Longleftrightarrow PbO_2(s) + O_2(g) + 2H^+(aq)$$

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบแคดเมียม – น้ำ ที่อุณหภูมิ25^{O}C [3]

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E – pH
$Cd^{2+} + 2e^- = Cd$	$E = -0.403 + 0.0295\log a_{Cd^{2+}}$
$Cd(OH)_2 + 2H^+ = Cd^{2+} + 2H_2O$	$pH = 6.874 - 0.5\log a_{Cd^{2+}}$
$Cd(OH)_2 + 2H^+ + 2e^- = Cd + 2H_2O$	$E = 0.004 - 0.0591(pH)$
$2H^+ + 2e^- = H_2$	$E = -0.0591(pH) - 0.0295\log P_{H_2}$
$O_2 + 4H^+ + 2e^- = 2H_2O$	$E = 1.228 - 0.0591(pH) + 0.0148\log P_2$
$O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	$E = 2.0755 + 0.0296\log(P_{O_3}/P_{O_2}) - 0.0591pH$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบ แคดเมียม- น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 2.2 แผนภูมิความต่างศักย์- pH ของระบบแคดเมียม-น้ำ ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตรสามารถสรุปได้ดังนี้

1. Cd^{2+} จะเสถียรภายใต้ pH ต่ำกว่า 8.5
2. การเปลี่ยน Cd^{2+} เป็น $Cd(OH)_2$ จะเกิดขึ้นตั้งแต่ pH 8.5
3. การตกตะกอน Cd^{2+} ด้วยเบสสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$Cd^{2+}(aq) + 2OH^-(aq) \Longleftrightarrow Cd(OH)_2(s)$$

ซึ่งการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH นั้น สามารถพิจารณาได้จากตัวอย่างในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงาน

ขั้นตอนการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ตอนดังนี้

3.1 การหาปริมาณแก๊สโอโซนจากเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน

การตรวจวัดหาปริมาณของโอโซนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีอัลตราไวโอเลต สเปคโตรโฟโตเมทรี หรือการใช้เทคนิคทางอิเล็กโตรเคมี ในโครงงานนี้จะใช้เทคนิคทางเคมีที่เรียกว่า วิธีไอโอโดเมทริก (Iodometric methods) โดยมีหลักการคือ ใช้สารละลายที่มีความจำเพาะต่อการเกิดปฏิกิริยากับโอโซนสูง เช่นสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ทำให้ได้สารใหม่เกิดขึ้นจากนั้นสามารถหาปริมาณโอโซนได้โดยการไทเทรตกับสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไทโอซัลเฟต หรือ ฟีนิลาซีนออกไซด์ เป็นต้น

3.1.1 สารเคมี

1) สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์จำนวน 20 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตรเขย่าให้เข้ากัน เก็บไว้ในขวดสีชา 1 คืนก่อนนำมาใช้
2) สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 โมลาร์
3) สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์โดยละลาย $Na_2S_2O_3.5H_2O$ จำนวน 25 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
4) น้ำแป้งเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยละลายแป้ง 1 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องผลิตโอโซนและชุดอุปกรณ์เติมแก๊สโอโซน
2) ถังออกซิเจน
3) เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
4) แท่งแม่เหล็ก
5) บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

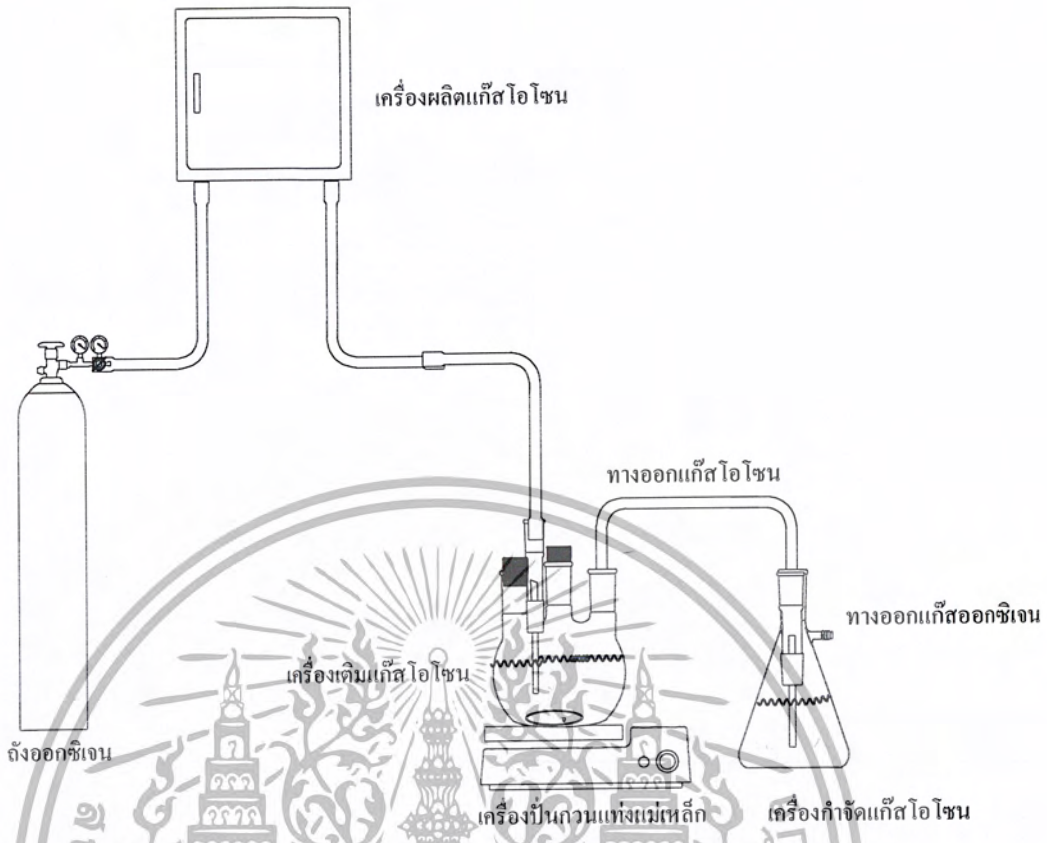
6) ปิเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร
7) นาฬิกาจับเวลา
8) สายยางซิลิโคน

3.1.3 วิธีการทดลอง

1) การดูดซึมแก๊สโอโซน
   ก. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 500 มิลลิลิตรในเครื่องเติมแก๊สโอโซน
   ข. ทำการเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1
   ค. ผ่านออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตโอโซนด้วยอัตราการไหล 0.5 ลิตร/นาที
   ง. เปิดเครื่องกวนด้วยอัตราการหมุน 500 รอบ/นาที
   จ. เปิดสวิตช์เครื่องผลิตโอโซน
   ฉ. ทำการจับเวลาทันทีที่เปิดเครื่อง
   ช. เมื่อครบ 2 นาทีแล้วให้ทำการหยุดเครื่องผลิตโอโซน
   ซ. เก็บสารละลายตัวอย่างที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากแก้วเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโอโซน
2) ทำการทดลองซ้ำที่อัตราการไหลเข้าของอากาศเท่าเดิมอีก 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละอัตราการไหล
3) เปลี่ยนค่าอัตราการไหลเข้าของอากาศเป็น 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ลิตร/นาที แล้วทำซ้ำ

โดยปกติจะแสดงค่าความเข้มข้นของโอโซนในรูปของค่าความดันย่อยของโอโซน โดยค่าความดันย่อยของโอโซนจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโอโซน ซึ่งการคำนวณค่าความดันย่อยของโอโซนจะแสดงในภาคผนวก ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาปริมาณแก๊สโอโซนจากเครื่องสังเคราะห์แก๊สโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เตรียมสารละลายตะกั่ว ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร โดยเตรียมจากการชั่งสาร $Pb(NO_3)_2$ (เลดทูไนเตรด) จำนวน 0.16 กรัม ในน้ำกลั่น เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3.2.2 เตรียมสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร โดยเตรียมจากการชั่งสาร $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ จำนวน 0.27 กรัม ละลายสารในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตรเขย่าสารละลายให้เข้ากัน

3.2.3 สารละลายผสมตะกั่วและแคดเมียม 0.1 กรัมต่อลิตร เตรียมโดยชั่ง $Pb(NO_3)_2$ จำนวน 0.16 กรัมและ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ จำนวน 0.27 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3.2.4 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ จำนวน 20 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตรเขย่าให้เข้ากัน

3.2.5 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยละลาย $Na_2S_2O_3.5H_2O$ จำนวน 25 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตรเขย่าให้เข้ากัน

3.2.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เตรียมโดยละลาย NaOH pellet ประมาณ 40 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3.2.7 กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เตรียมโดยนำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 36.75 มิลลิลิตรมาเจือจาง โดยเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

3.3 การออกซิไดซ์ตะกั่วด้วยโอโซน

จากแผนภูมิของความต่างศักย์ - pH จะช่วยให้คาดการณ์ถึงแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ โดยสภาวะที่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ ค่า pH ความเข้มข้นของโอโซน อุณหภูมิ ความเร็วในการกวนสารละลาย ซึ่งในโครงงานนี้จะศึกษาค่า pH ของสารละลายตะกั่ว โดยจะใช้ข้อมูลจากแผนภูมิความต่างศักย์-pH เป็นข้อมูลอ้างอิงในการหาช่วงของ pH ที่เหมาะสมในการออกซิไดซ์ตะกั่ว ให้อยู่ในรูปของตะกั่วออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ โดยในกรณีของตะกั่วจะตกตะกอนเป็น PbO_2 ในช่วง pH 0-5.8

3.3.1 สารเคมี

1) สารละลายตะกั่วความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร
2) สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3) HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) NaOH ความเข้มข้น 1 โมลาร์
5) KI ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องผลิตโอโซนและชุดอุปกรณ์เติมแก๊สโอโซน
2) ถังออกซิเจน
3) เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
4) แท่งแม่เหล็ก
5) สายยางซิลิโคน
6) เครื่อง pH มิเตอร์
7) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร
8) หลอดหยดสาร
9) ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
10) กระบอกตวงขนาด 250 มิลลิลิตร
11) กรวยกรอง
12) นาฬิกาจับเวลา
13) ขวดเก็บสารตัวอย่าง
14) กระดาษกรองเบอร์ 42
15) จุกยาง

3.3.3 สภาวะที่ทำการทดลอง

1) อัตราเร็วของแก๊สโอโซน 0.5 กรัม/ชั่วโมง
2) pH ของสารละลายตะกั่วที่ศึกษาเท่ากับ 4.0, 4.5, 4.7, 5.0, 5.1
3) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

3.3.4 วิธีการทดลองการออกซิเดชัน

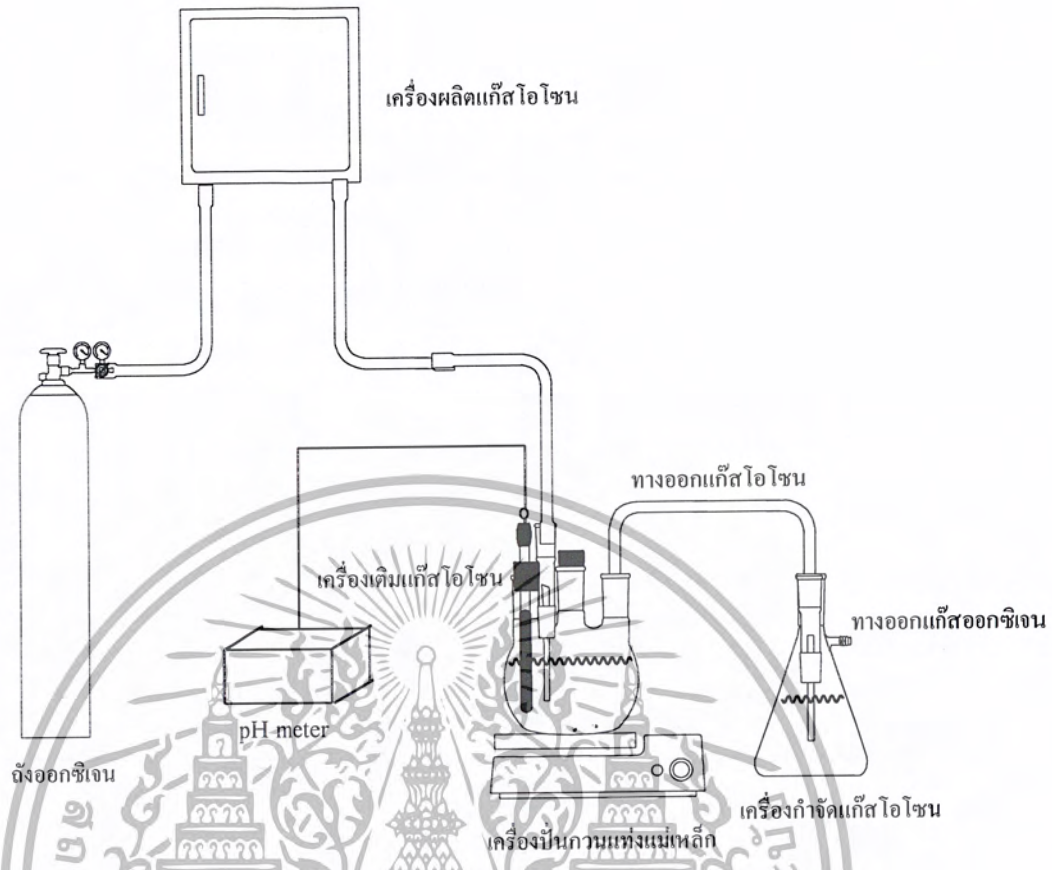
1) เติมสารละลายตะกั่ว ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตรในเครื่องเติมโอโซน
2) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 250 มิลลิลิตรในขวดกำจัดโอโซนเพื่อกำจัดโอโซนที่เหลือจากปฏิกิริยา
3) ทำการเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2
4) เปิดเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 700 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 4.0 โดยไทเทรตกรดไฮโดรคลอริก เมื่อสารละลายเป็นเบสมากเกินไปหรือไทเทรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายเป็นกรดมากเกินไป
6) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะประมาณ 10 มิลลิลิตร ในขวดเก็บตัวอย่าง เมื่อสารละลายมีค่า pH ตามต้องการ (ที่เวลา 0 นาที)
7) เปิดวาล์วที่ถังออกซิเจนให้ออกซิเจนไหลเข้าเครื่องผลิตโอโซน ปรับอัตราการไหลตามที่กำหนดไว้
8) เปิดสวิตช์เพื่อเดินเครื่องผลิตโอโซน พร้อมทั้งจับเวลา
9) เก็บตัวอย่างของสารละลายโลหะหนักประมาณ 8 มิลลิลิตรทุกๆ 10 นาที ในช่วงต้นของการทดลองด้วยปีเปตขนาด 10 มิลลิลิตร จนเมื่อ pH ของสารละลายเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วให้เก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาทีและปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา หยุดทำการทดลองเมื่อ pH ของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง
10) กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
11) นำตัวอย่างของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วโดยใช้เครื่องอะตอมมิกส์แอบซอร์พชัน
12) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนค่า pH เท่ากับ 4.5, 4.7, 5.0, 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.2 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกซิไดซ์ตะกั่วด้วยโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
50254

3.4 การตกตะกอนแคดเมียมโดยใช้สารละลายเบส

เนื่องจากแคดเมียมไม่สามารถตกตะกอนโดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนได้ ดังนั้นจึงทำการตกตะกอนโดยใช้เบส ซึ่งตะกอนที่ได้จะอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ โดยจากแผนภูมิของความต่างศักย์-pH จะช่วยให้คาดการณ์ถึงแนวโน้มของ pH ในการทำให้เริ่มเกิดตะกอนของไฮดรอกไซด์ได้ จากแผนภูมิความต่างศักย์-pH พบว่า pH ที่จะตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์ได้ค่า pH ต้องมากกว่า 8.5 ขึ้นไป

3.4.1 สารเคมี

1) สารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร
2) HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์
3) NaOH ความเข้มข้น 1 โมลาร์

3.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

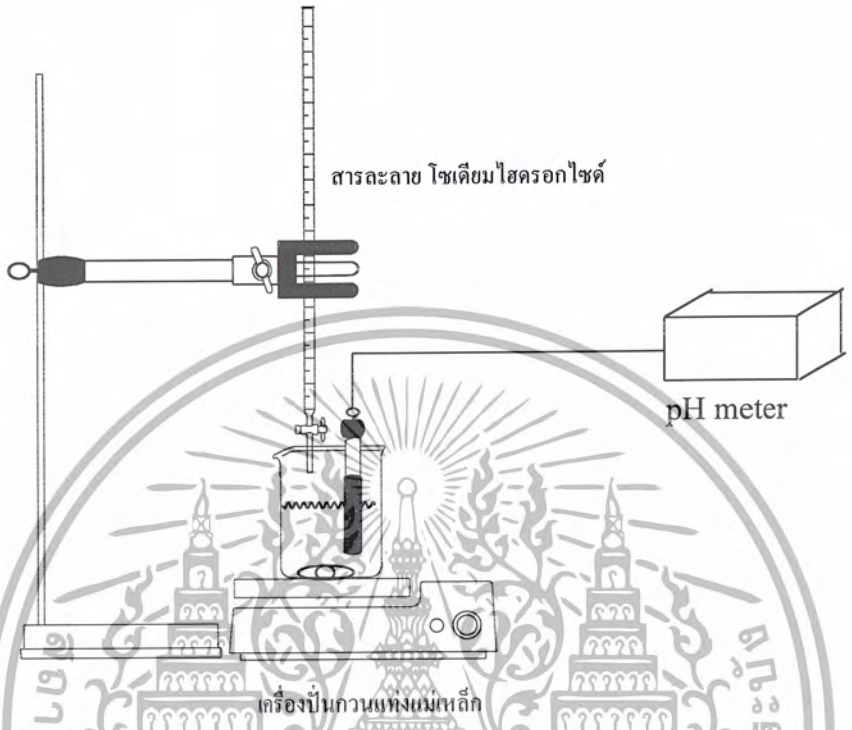
1) บีกเกอร์
2) เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
3) แท่งแม่เหล็ก
4) เครื่อง pH มิเตอร์
5) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร
6) หลอดหยดสาร
7) ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
8) กระบอกตวงขนาด 250 มิลลิลิตร
9) กรวยกรอง
10) นาฬิกาจับเวลา
11) กระดาษกรองเบอร์ 42

3.4.3 วิธีการทดลองการตกตะกอนแคดเมียมด้วยเบส

1) ใส่สารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร ลงในบีกเกอร์จำนวน 500 มิลลิลิตร แล้วทำการเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.3
2) กวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก
3) ใช้ pH มิเตอร์วัดค่า pH ของสารละลาย
4) หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายโลหะหนัก ไปเรื่อยๆสังเกตตะกอนโลหะหนัก หากเริ่มมีตะกอนเกิดขึ้นให้สังเกตค่า pH ที่เริ่มเกิดตะกอนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) กรองสารละลาย แล้วเก็บตะกอนนำไปตรวจหาองค์ประกอบของตะกอนด้วยเครื่อง X-ray diffractrometer



รูปที่ 3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตกตะกอนแคดเมียมด้วยเบส

3.5 การแยกตะกอนของโลหะผสมระหว่างแคดเมียมกับตะกั่วที่ pH ที่เหมาะสม

3.5.1 สารเคมี

1) สารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร
2) สารละลายตะกั่วความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร
3) HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์
4) NaOH ความเข้มข้น 1 โมลาร์
5) KI ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องผลิตโอโซนและชุดอุปกรณ์เติมแก๊สโอโซน
2) ถังออกซิเจน
3) เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) แท่งแม่เหล็ก
5) สายยางซิลิโคน
6) เครื่อง pH มิเตอร์
7) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร
8) หลอดหยดสาร
9) ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
10) กระบอกตวงขนาด 250 มิลลิลิตร
11) กรวยกรอง
12) นาฬิกาจับเวลา
13) ขวดเก็บสารตัวอย่าง
14) กระดาษกรองเบอร์ 42
15) จุกยาง

3.5.3 วิธีการทดลองการแยกตกตะกอนตะกั่วและแคดเมียมออกจากกันด้วย

1) เติมสารละลายผสมตะกั่วและแคดเมียม ความเข้มข้นอย่างละ 0.1 กรัม/ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในเครื่องเติม โอโซน
2) เติมสารละลายโพแทสเซียม ไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดกำจัดโอโซนเพื่อกำจัดโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
3) เปิดเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 700 รอบ/นาที
4) ปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 5.0 โดยไทเทรตกรดไฮโดรคลอริก เมื่อสารละลายโลหะเป็นเบสมากเกินไปหรือไทเทรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายเป็นกรดมากเกินไป
5) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะประมาณ 8 มิลลิลิตร ในขวดเก็บตัวอย่างเมื่อสารละลายมีค่า pH ตามต้องการ (ที่เวลา 0 นาที)
6) เปิดวาล์วที่ถังออกซิเจนให้ออกซิเจนไหลเข้าเครื่องผลิตโอโซนปรับอัตราการไหลตามที่กำหนดไว้
7) เปิดสวิตช์เพื่อเดินเครื่องผลิตโอโซน พร้อมทั้งจับเวลา
8) เก็บตัวอย่างของสารละลายโลหะหนักประมาณ 8 มิลลิลิตรทุกๆ 10 นาที ในช่วงต้นของการทดลองด้วยปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร จนเมื่อ pH ของสารละลายเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วให้เก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาทีและปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา หยุดทำการทดลองเมื่อ pHของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42

10) นำตัวอย่างของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วและแคดเมียมโดยใช้เครื่องอะตอมมิกส์แอบซอร์พชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

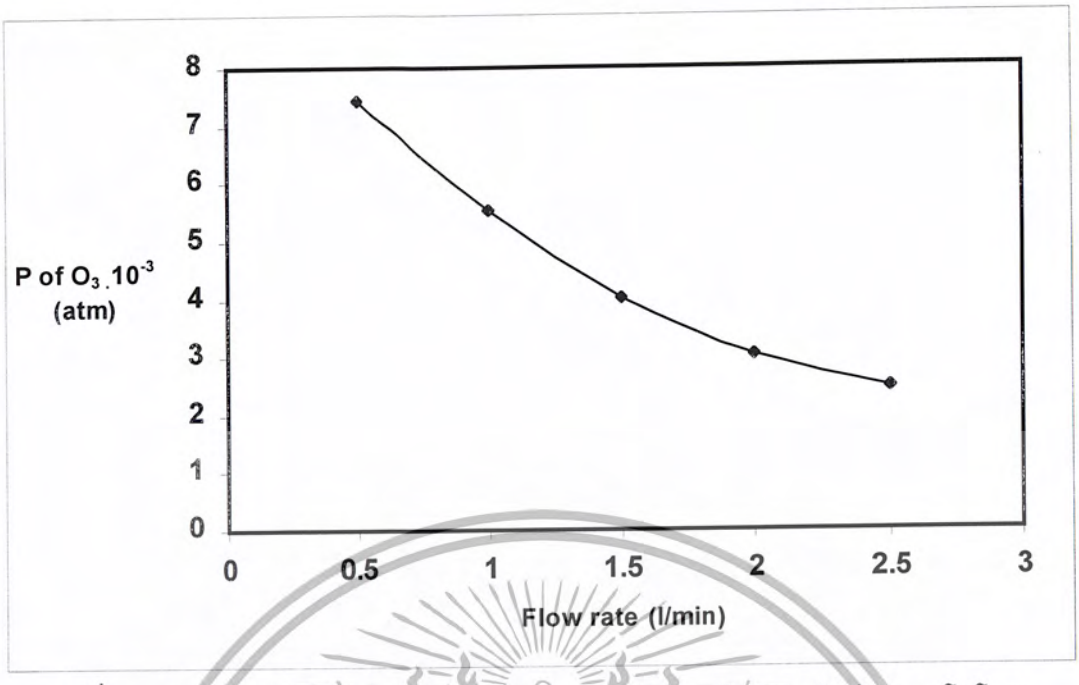
4.1 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การทดลองหาปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ที่ใช้ในการไทเทรตและปริมาณของโอโซนที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ที่ใช้ในการไทเทรตและปริมาณของโอโซนที่สังเคราะห์ได้

อัตราการไหลของออกซิเจน (ลิตร/นาที)	ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณของโอโซนที่สังเคราะห์ได้ (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)	ค่าความดันย่อยโอโซน (บรรยากาศ)
0.5	4.95	356.4	7.4249×10^{-3}
1.0	6.6	475.2	5.5431×10^{-3}
1.5	7.15	514.8	4.0040×10^{-3}
2.0	7.2	518.4	3.0240×10^{-3}
2.5	7.4	532.8	2.4684×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจนกับความดันย่อยของโอโซน

ตอนที่ 2 การออกซิเดชันตะกั่วและ/หรือ แคดเมียม ด้วยโอโซน

ผลการทดลองที่ได้แสดงเป็นค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายโลหะที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ ที่ค่า pH ใดๆ

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 4.0

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)
0	100.10
45	100.09
60	100.09
75	100.00
90	99.98
100	99.98
110	99.99
120	99.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว(ppm)
130	99.98
140	99.98
150	99.98
160	99.99
170	99.97
200	99.97

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆ ที่ pH 4.5

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)
0	100.00
30	96.00
45	91.90
60	83.70
90	70.40
110	54.70
120	41.60
130	20.10
140	8.80
150	5.20
160	4.20
170	4.00
180	4.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 4.7

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)
0	100.00
30	95.50
40	91.60
50	85.20
70	76.40
80	69.20
90	55.80
100	40.00
105	32.20
110	24.00
115	14.00
120	5.50
130	5.10
140	3.20
145	2.90
155	2.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 5.0

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)
0	100.00
10	96.20
15	88.30
20	80.80
25	68.70
30	62.70
35	58.60
40	47.50
45	41.80
50	30.90
55	26.40
60	19.30
65	3.90
70	0.00
75	0.00
80	0.00
85	0.00
90	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 5.1

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)
0	100.00
10	96.10
20	76.20
25	67.10
30	58.90
35	50.60
40	43.30
45	34.00
50	25.80
55	17.30
60	9.60
65	1.90
70	0.00
75	0.00
80	0.00
85	0.00
90	0.00

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในสารละลาย ณ เวลาต่างๆที่ pH 7.0

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของแคดเมียม (ppm)
0	100.00
30	100.00
60	100.00
90	100.00
120	100.00
150	100.00
180	100.00
210	100.00
240	100.00

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของตะกั่วกับแคดเมียมที่เหลือในสารละลายผสม ณ เวลาต่างๆที่ pH 5.0

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)	ความเข้มข้นของแคดเมียม (ppm)
0	100.00	100.00
15	98.50	100.00
20	93.70	100.00
25	93.40	100.00
30	84.20	100.00
35	74.80	100.00
40	64.60	100.00
45	63.50	100.00
50	50.20	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

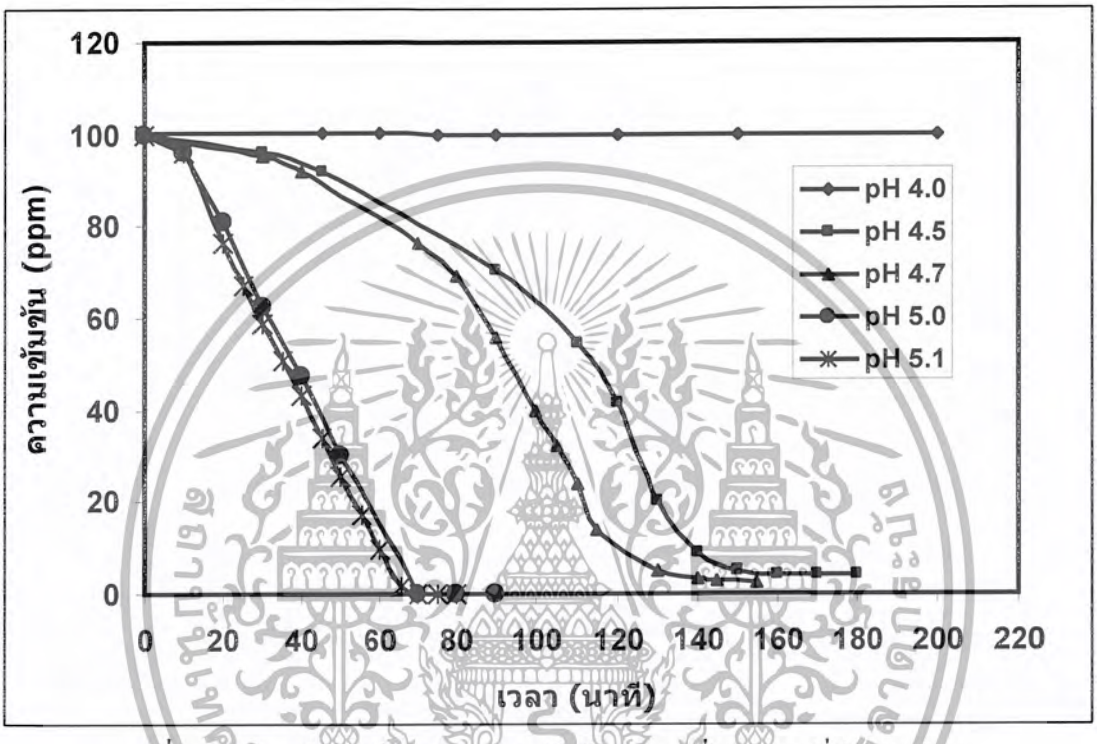
เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (ppm)	ความเข้มข้นของแคดเมียม (ppm)
55	43.70	100.00
60	36.30	100.00
65	29.10	100.00
70	23.00	100.00
75	14.20	100.00
80	7.40	100.00
85	1.50	100.00
90	1.00	100.00
95	0.00	100.00
100	0.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 การหา pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยโอโซน

จากผลการทดลอง สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่า pH ต่างๆดังรูป



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับเวลาที่ค่า pH ต่างๆ

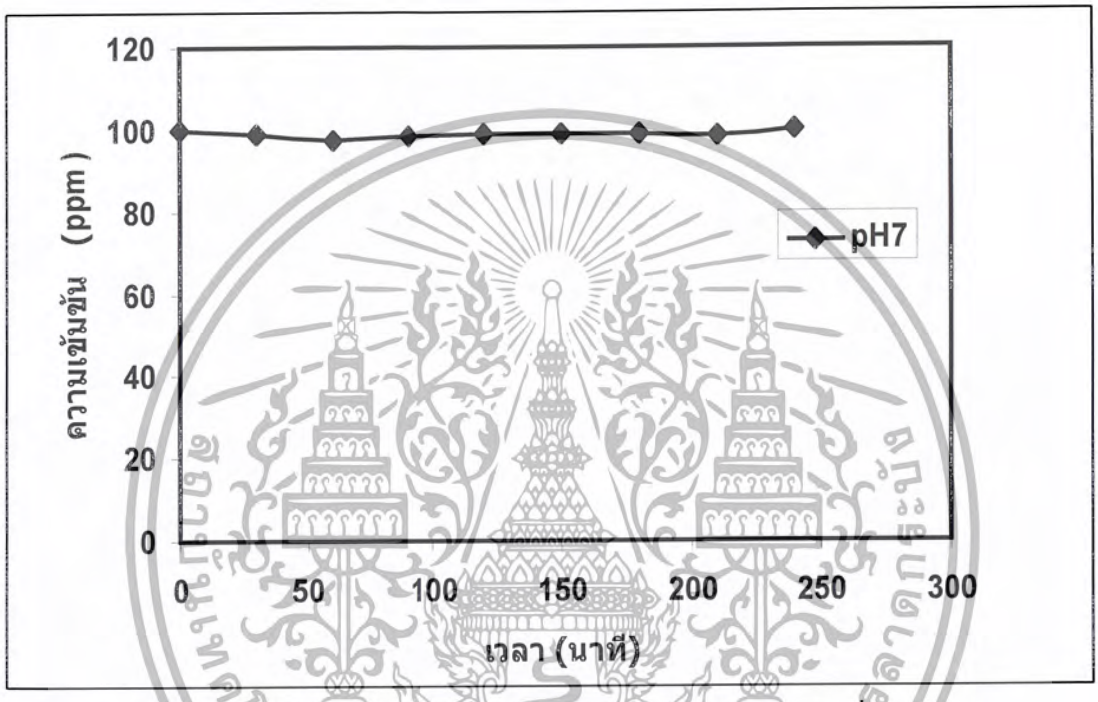
พิจารณารูปที่ 4.2 สำหรับสารละลายตะกั่วเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (100 ppm) พบว่าที่ pH 4.0 ความเข้มข้นของสารละลายคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแสดงว่าที่ pH 4.0 ปฏิกิริยาออกซิเดชันยังไม่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่านี้ถึงจะเกิดการออกซิไดซ์ ส่วนที่ pH 4.5 มีค่าความเข้มข้นเหลือเท่ากับ 74.6 ppm และที่ pH 4.7 มีค่าความเข้มข้นเหลือประมาณ 71 ppm ที่เวลาเดียวกัน ส่วนที่ pH 5.0 และ pH 5.1 พบว่ามีแนวโน้มการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วใกล้เคียงกันมาก โดยความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วลดลงจนเข้าสู่ศูนย์ภายในเวลา 70 นาที ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายตะกั่วที่ pH อื่นๆ แต่การทดลองที่ pH 5.1 พบว่าการทดลองที่สภาวะนี้ไม่เสถียร เนื่องจากค่า pH จะแกว่งมากจนไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ โดยช่วงการแกว่งของค่า pH จะอยู่ในช่วงระหว่าง 5.1-5.5 และที่ pH มากกว่า 5.8 จะเกิดตะกอน $Pb(OH)_2$ ซึ่งไม่ทำการศึกษา ดังนั้น pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตะกั่วด้วยโอโซน คือ pH 5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าเมื่อค่า pH ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นจะสามารถแยกตะกอนของตะกั่วออกมาได้มากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการ (4.1)

$$PbO_2 + 4H^+ + 2e^- = Pb^{2+} + 2H_2O \qquad (4.1)$$

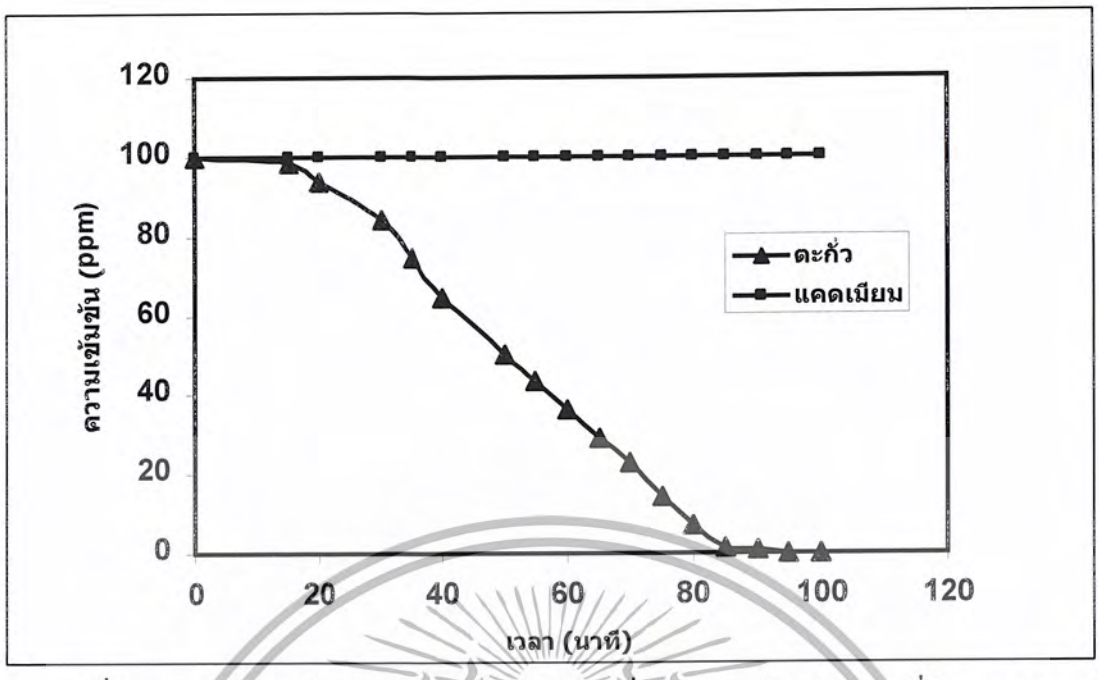
โดยเมื่อความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนลดลง (pH เพิ่มขึ้น) สมดุลของสมการจะเลื่อนมาทางซ้ายมือ ทำให้เกิดตะกอนของ PbO_2 มากขึ้น



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมกับเวลาที่ค่า pH 7.0

พิจารณารูปที่ 4.3 สำหรับสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (100 ppm) ที่ pH 7.0 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะคงที่ ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงว่าสารละลายแคดเมียมไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโอโซนได้ ส่วนที่ pH มากกว่า 8.5 จะเกิดตะกอนในรูป $Cd(OH)_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมกับเวลา ที่ค่า pH 5.0

พิจารณารูปที่ 4.4 สำหรับสารละลายผสมตะกั่วกับแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (100 ppm) ที่ pH 5.0 พบว่าสามารถแยกตะกั่วออกจากแคดเมียมได้หมด โดยการตกตะกอนตะกั่วด้วยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน และใช้เวลาในการออกซิไดซ์จนความเข้มข้นของตะกั่วเข้าสู่ศูนย์ประมาณ 85 นาที ซึ่งแสดงว่าใช้เวลานานกว่าการออกซิไดซ์ตะกั่วเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลจากอนุภาคของแคดเมียมที่ผสมอยู่ในสารละลายนั่นเอง

4.2.2 การหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา

จากจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยโอโซน จะได้ว่า

$$\frac{-d[M(II)]}{dt} = k_0[M(II)]^l[O_3]^m[H^+]^n \qquad (4.2)$$

เมื่อ $[M(II)]$ = ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่อยู่ในรูป 2+ (โมล/ลิตร)

t = เวลา (นาที)

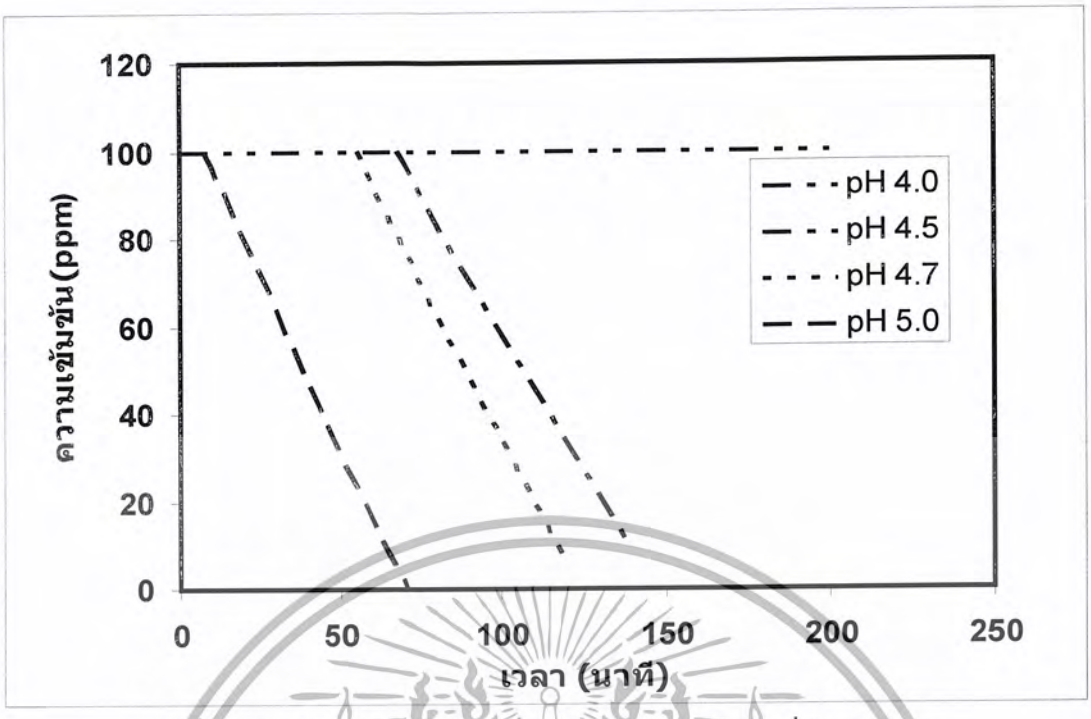
$[O_3]$ = ความเข้มข้นของโอโซน (โมล/ลิตร)

$[H^+]$ = ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน (โมล/ลิตร)

k_0 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา โมล$^{(1-m-n)}$.ลิตร$^{(m+n-1)}$.นาที$^{-1}$

l, m, n = อันดับของปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แนวโน้มของกราฟ รูปที่ 4.2 ในลักษณะเชิงเส้นที่ค่า pH ต่างๆ

เพื่อให้ผลการคำนวณหาค่าอันดับของปฏิกิริยามีค่าที่ถูกต้อง จึงพิจารณาเฉพาะช่วงต้นของกราฟในแต่ละ pH ให้มีลักษณะเป็นเส้นตรงคือในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 140 นาที ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะพบว่าที่ค่า pH หนึ่งๆ $[M(II)]$ มีความสัมพันธ์กับเวลาในลักษณะเชิงเส้น แสดงว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย (ค่า 1 = 0) ส่วนในกรณีของแคดเมียมไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการเติมโอโซนจึงไม่นำมาพิจารณาและเนื่องจากโครงงานนี้ได้ทำการศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการออกซิเดชันโลหะหนักด้วยโอโซน ดังนั้นจึงใช้ความเข้มข้นของโอโซนคงที่ตลอดการทดลอง จากสมการที่ (4.2) จะได้ว่า

$$\frac{-d[M(II)]}{dt} = k[H^+]^n \qquad (4.3)$$

เมื่อ V = อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย (โมล/ลิตร-นาที)

$k = k_0 [O_3]^m$

= ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (โมล$^{(1-n)}$. ลิตร$^{(n-1)}$. นาที$^{-1}$)

ใส่ลอการิทึมฐานสิบในสมการที่ (4.3) จะได้

$$\log V = \log k + n \log [H^+] \qquad (4.4)$$

จาก $pH = -\log [H^+]$ สมการที่ (4.4) จะกลายเป็น

$$\log V = \log k - n\, pH \qquad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะสามารถหาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้จากการสร้างกราฟระหว่าง log V กับ pH โดยมีความชันเท่ากับ –n และจุดตัดแกน y เท่ากับ log k

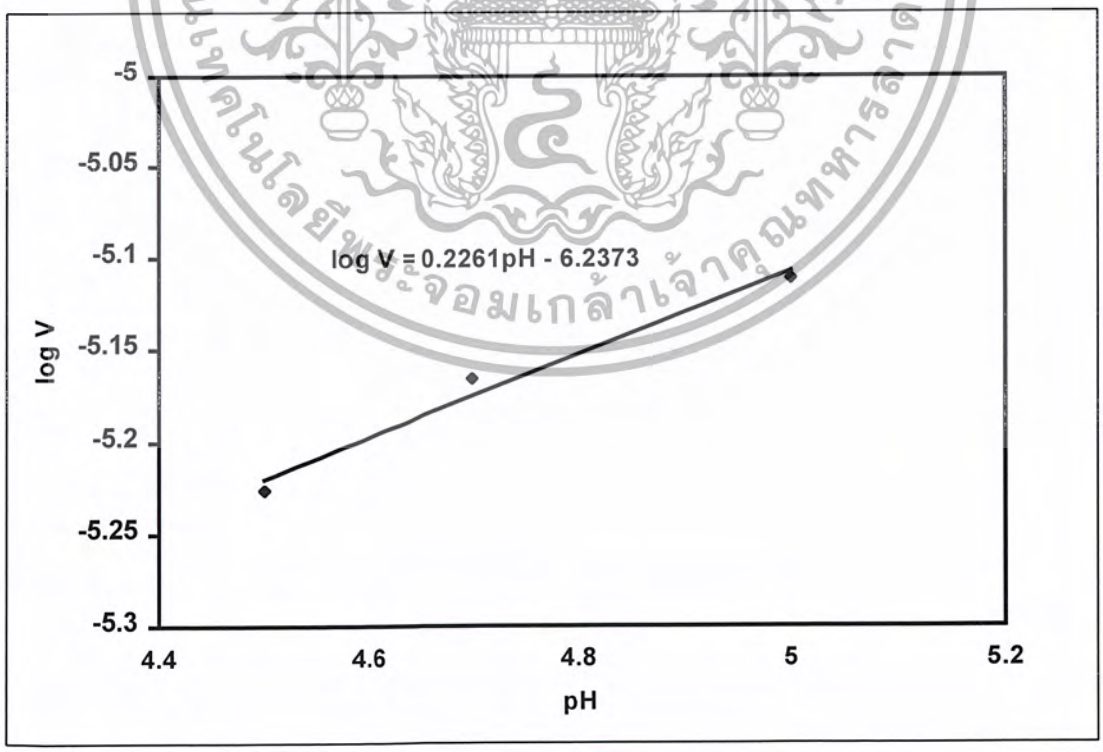
ส่วนค่า V สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายกับเวลาที่ค่า pH ต่างๆดังแสดงในรูปที่ (4.5)

จากกราฟในรูปที่ 4.5 สามารถหาค่า log V ของตะกั่วที่ pH ต่างๆได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่า log V ที่ pH 4.0, 4.5, 4.7, 5.0 สำหรับตะกั่ว

pH	ความชันจากรูปที่4.2 (พีพีเอ็ม/นาที)	V (โมล/ลิตร-นาที)	log V
4.0	0	0	---
4.5	-1.2318	5.9456×10^{-6}	-5.226
4.7	-1.4184	6.8466×10^{-6}	-5.165
5.0	-1.6038	7.7416×10^{-6}	-5.111

มวลโมเลกุลของตะกั่ว **207.19** กรัม/โมล



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log V กับ pH ของตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 สามารถหาอันดับและค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยาได้ โดยอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับค่าติดลบของความชัน และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเท่ากับ $10^{\text{จุดตัดแกน}}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าอันดับและค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยาสำหรับตะกั่ว

โลหะ	อันดับของปฏิกิริยา	ค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยา
ตะกั่ว	-0.2261	5.79×10^{-7}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

5.1.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะตะกั่วด้วยโอโซนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH 5.0 และสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วจาก 0.1 กรัม/ลิตรจนเข้าสู่ศูนย์ภายในเวลา 70 นาที เพราะฉะนั้นที่ pH 5.0 จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อกำจัดตะกั่วออกจากสารละลายด้วยโอโซน และสามารถคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้เท่ากับ-0.2261และ5.79×10^{-7} โมล$^{(1.2261)}$.ลิตร$^{(-1.2261)}$.นาที$^{-1}$ ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันสารละลายตะกั่วด้วยโอโซนได้ ดังนี้

$$\frac{-d[M(II)]}{dt} = -5.79\times10^{-7}\,[\mathrm{Pb(II)}]^{0}\,[\mathrm{H^{+}}]^{-0.2261}$$

5.1.2 ไม่สามารถออกซิไดซ์โลหะแคดเมียมด้วยโอโซนได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากธรรมชาติของแคดเมียมไม่มีสภาวะการถูกออกซิไดซ์ได้นั่นเอง ดังนั้นจึงทำการแยกแคดเมียมโดยทำให้ตกตะกอนด้วยเบสที่ pH มากกว่า 8.5 แทน

5.1.3 สำหรับสารละลายผสมตะกั่วและแคดเมียม พบว่าที่ pH 5.0 สามารถแยกตะกั่วออกจากสารละลายโดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนได้หมดภายในเวลา 85 นาที ส่วนแคดเมียมที่ยังคงอยู่ในสารละลายจะถูกแยกออกโดยการเติมเบสให้ตกตะกอนที่ pH มากกว่า 8.5

5.1.4 ผลจากการตรวจตะกอนด้วยเครื่อง X-ray diffraction ตะกอนของตะกั่วที่เกิดจากการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนจะอยู่ในรูปของ PbO_2 ดังสมการ

$$Pb^{2+}(aq) + O_3(g) + H_2O(l) \Longleftrightarrow PbO_2(s) + O_2(g) + 2H^{+}(aq)$$

ส่วนตะกอนไฮดรอกไซด์ของแคดเมียมจะอยู่รูป $Cd(OH)_2$ ดังสมการ

$$Cd^{2+}(aq) + 2OH^{-}(aq) \Longleftrightarrow Cd(OH)_2(s) + 2e^{-}$$

ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่ได้จากแผนภูมิความต่างศักย์- pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง

5.2.1 สำหรับโครงงานนี้ตัวแปรที่สำคัญคือ ค่า pH ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะถูกต้องมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับค่า pH ที่ทำการควบคุม ดังนั้นการควบคุมค่า pH ให้คงที่จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง

5.2.2 ในสารละลายตะกั่วหากมีน้ำมันปนเปื้อนอยู่ด้วย จะไม่สามารถตกตะกอนตะกั่วโดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนได้ ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองต้องมั่นใจว่าไม่มีน้ำมันเกาะอยู่

5.2.3 หลังจากทำการทดลองในแต่ละครั้งเสร็จสิ้นแล้ว จะเกิดคราบตะกอนของตะกั่วขึ้นภายในอุปกรณ์เติมโอโซน ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองในครั้งต่อๆไปเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องแช่อุปกรณ์เติมโอโซนด้วยกรดไฮโดรคลอริกทิ้งไว้ 1 คืนและก่อนที่จะทำการทดลองครั้งต่อไป ต้องล้างอุปกรณ์เติมโอโซนให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นก่อนทุกครั้ง

5.2.4 ต้องทำความสะอาดขั้วอิเล็กโทรดของ pH มิเตอร์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกทุกครั้งหลังจากเสร็จการทดลอง เนื่องจากคราบตะกอนของตะกั่วที่จับบนขั้วอิเล็กโทรด อาจทำให้ค่า pH ที่วัดได้ในการทดลองครั้งต่อๆไปเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

5.2.5 โลหะหนักที่ใช้ในการทดลองมีอันตรายต่อร่างกายเป็นอย่างยิ่ง เพราะมันสามารถซึมผ่านผิวหนังเข้าไปสะสมในร่างกายได้ อีกทั้งโอโซนก็เป็นสารที่มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ดังนั้นในการทำการทดลองจึงต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ

5.2.6 หลังจากทำการทดลองเสร็จในแต่ละครั้ง จะรวมรวบสารละลายโลหะหนักที่เหลือไว้ในแกลลอนทิ้งสาร จากนั้นจะทำการแยกเอาโลหะหนักที่เหลือในสารละลายออกโดยใช้เบสในการตกตะกอนแล้วกรองเอาตะกอนโลหะหนักออก ก่อนปล่อยน้ำเสียทิ้งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ห้องสมุดอิเล็กทรอนิกส์, 3 มีนาคม 2531. **แร่และการอนุรักษ์** .
ศูนย์ส่งเสริมการศึกษาตามอัธยาศัย กรมการศึกษานอกโรงเรียน กระทรวงศึกษาธิการ.
<URL:http://dnfe5.nfe.go.th/ilp/resource/sc31-5-3.htm>

2. Rieger. **Electrochemistry**. Prentice Hall , 1987.

3. ณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์, ธนณชัย บุญนที . **การจำกัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยโอโซน.**
วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542 .

4. ฉัตรชยา ตันติเวชยานนท์, วันจักร โชครัตนชัย . **การจำกัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวิธีโอโซน**
วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543 .

5. Werner Stumn ,James J. **Morgan. Aquatic Chemistry**, 3rd ed. 605 Third Avenue, New York: John & Sons,Inc.,1996.

6. Vogel, **Textbook of Quantative Chemical Analysis** , 5th ed.,1989

7. M. Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution, Pergamon,New York, 1966.

8. Rip G. Rice,Aharan NetZer, **Handbook of Ozone Technology and Application**, Vol.II, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ก

ตาราง ก.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Reaction	E°/V
$F_2 + 2e^- \longrightarrow 2F^-$	2.87
$S_2O_8^{2-} + 2e^- \longrightarrow 2SO_4^{2-}$	1.96
$Co^{3+} + e^- \longrightarrow Co^{2+}$	1.92
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2H_2O$	1.763
$Ce^{4+} + e^- \longrightarrow Ce^{3+}$ (in 1 M $HClO_4$)	1.70
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \longrightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51
$Cl_2 + 2e^- \longrightarrow 2Cl^-$	1.358
$Tl^{3+} + 2e^- \longrightarrow Tl^+$	1.25
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \longrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$	1.229
$Br_2 + 2e^- \longrightarrow 2Br^-$	1.065
$AuCl_4^- + 3e^- \longrightarrow Au + 4Cl^-$	1.002
$Pd^{2+} + 2e^- \longrightarrow Pd$	0.915
$Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag$	0.7991
$Fe^{3+} + e^- \longrightarrow Fe^{2+}$	0.771
$O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O_2$	0.695
$I_2(s) + 2e^- \longrightarrow 2I^-$	0.535
$Cu^+ + e^- \longrightarrow Cu$	0.520
$Fe(CN)_6^{3-} + e^- \longrightarrow Fe(CN)_6^{4-}$	0.361
$Co(dip)_3^{3+} + e^- \longrightarrow Co(dip)_3^{2+}$	0.34
$Cu^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cu$	0.34
$Ge^{2+} + 2e^- \longrightarrow Ge$	0.247
$PdI_4^{2-} + 2e^- \longrightarrow Pd + 4I^-$	0.18
$Sn^{4+} + 2e^- \longrightarrow Sn^{2+}$	0.15
$Ag(S_2O_3)_2^{3-} + e^- \longrightarrow Ag + 2S_2O_3^{2-}$	0.017
$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$	0.00
$Ge^{4+} + 2e^- \longrightarrow Ge^{2+}$	0.00
$Pb^{2+} + 2e^- \longrightarrow Pb$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Sn$	-0.14
$Ni^{2+} + 2e^- \longrightarrow Ni$	-0.257
$Tl^+ + e^- \longrightarrow Tl$	-0.336
$Cd^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cd$	-0.403
$Fe^{2+} + 2e^- \longrightarrow Fe$	-0.44
$Zn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Zn$	-0.7626
$Na^+ + e^- \longrightarrow Na$	-2.713
$Li^+ + e^- \longrightarrow Li$	-3.040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 พลังงานอิสระกิบส์ที่สภาวะมาตรฐาน (ΔG^0) ของสารบางชนิด

Species	ΔG^0
Co(Metal)	0
Co^{2+} (aq)	-54.4
Co^{3+} (aq)	-134.0
$HCoO_2$	-407.5
$Co(OH)_2$ (aq)	-369.0
$Co(OH)_3$ (aq)	-596.6
Co_3O_4(Cobalt Spinel)	-725.5
Cu(Metal)	0
Cu^{2+} (aq)	65.5
CuO(Tenorite)	-129.7
Cu_2O	-146.0
Fe(metal)	0
Fe^{2+} (aq)	-78.87
$Fe(OH)_2$ (precip)	-486.6
Fe^{3+} (aq)	-4.6
$Fe(OH)_3$ (precip)	-699(-712)
H_2 (g)	0
H^+ (aq)	0
H_2O (l)	-237.18
Mn(Metal)	0
Mn^{2+} (aq)	-228.0
$Mn(OH)_2$ (precip)	-616.0
Mn_3O_4 (Hausmannite)	-1281.0
MnO_2(Manganate)(IV)	-453.1
Ni (Metal)	0
Ni^{2+} (aq)	-45.6
$Ni(OH)_2$	-496.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 (ต่อ)

Species	ΔG^0
O_2 (g)	0
O_3 (g)	163.2
Pb (Metal)	0
Pb^{2+} (aq)	-24.39
PbO (yellow)	-187.9
PbO_2	-217.4
Pb_3O_4	-601.2
$Pb(OH)_2$	-452.2
$Cd(OH)_2$ (precip)	-473.6
CdO (s)	-228.4
$Cd(OH)_2$ (aq)	-392.2
$Cd(CO_3)$ (s)	-669.4
$Cd(OH)^+$ (aq)	-284.5
Zn (Metal)	0
Zn^{2+} (aq)	-147.0
$Zn(OH)_2$ (aq)	-522.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH

<u>พิจารณากรณีระบบ ตะกั่ว – น้ำ</u>

1. กรณีที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา

ปฏิกิริยา : $Pb^{2+} + 2e^{-} \Longleftrightarrow Pb$ (ข.1)

จากสมการของเนิสต์ (2.13) ที่ว่า

$$E = E^{\theta} - \frac{0.0591}{n} \log K_{eq} \qquad (2.13)$$

โดยค่า E^{O} ของปฏิกิริยานี้เท่ากับ –0.126 โวลต์ หรือสามารถหาได้จาก

$$E^{O} = -\Delta G^{O} / nF \qquad (2.11)$$

เมื่อ $\Delta G^{O} = \Delta G^{O}_{\text{ผลิตภัณฑ์}} - \Delta G^{O}_{\text{สารตั้งต้น}}$ (ข.2)

และจากปฏิกิริยา (ข.1) จำนวนอิเล็กตรอน (n) เท่ากับ 2

จากสมการ (2.6) จะได้ว่า

$$K_{eq} = a_{Pb} / a_{Pb^{2+}} \qquad (ข.3)$$

ค่าแอกติวิตีของตะกั่วบริสุทธิ์จะเท่ากับ 1 เพราะฉะนั้น

$$K_{eq} = 1 / a_{Pb^{2+}} \qquad (ข.4)$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการ (2.13) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$E = -0.126 + 0.0259 \log a_{Pb^{2+}} \qquad (ข.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กรณีที่ไม่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา

กรณีนี้ไม่สามารถใช้สมการของเนิสต์คำนวณได้ เพราะค่า n จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จึงต้องคำนวณโดยใช้ค่าพลังงานอิสระของกิบส์

ปฏิกิริยา :

$$Pb^{2+} + 2H_2O \iff Pb(OH)_2 + 2H^+ \qquad (2.1)$$

จาก $$\Delta G^O = - RT \ln K_{eq} \qquad (2.5)$$

เมื่อ $$\Delta G^O = \Delta G^O_{Pb(OH)_2} + 2\Delta G^O_{H^+} - \Delta G^O_{Pb^{2+}} - 2\Delta G^O_{H_2O}$$

โดยค่า ΔG^O ของสารต่างๆ มีดังนี้

$\Delta G^O_{Pb(OH)_2}$ = - 452.2 กิโลจูล/โมล

$\Delta G^O_{Pb^{2+}}$ = - 24.39 กิโลจูล/โมล

$\Delta G^O_{H^+}$ = 0 กิโลจูล/โมล

$\Delta G^O_{H_2O}$ = - 237.18 กิโลจูล/โมล

เพราะฉะนั้นจะได้

ΔG^O = 46,550 จูล/โมล

แทนค่าในสมการ (2.5) จะได้

$$46{,}550 = - (8.314)(25+273)(2.3) \log[(a_{H^+})^2 / a_{Pb^{2+}}]$$

$$pH = 4.084 - 0.5 \log a_{Pb^{2+}} \qquad (ข.6)$$

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

สำหรับ $a_{Pb^{2+}} = 1$

$$pH = 4.084$$

สำหรับระบบ แคดเมียม – น้ำ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ค

วิธีการคำนวณหาปริมาณโอโซน

จากปฏิกิริยา

$$O_3 + KI + H_2O \Longleftrightarrow O_2 + I_2 + 2KOH \qquad (ค.1)$$

ไม่มีสี สีเหลืองหรือส้ม

$$I_2 + 2Na_2S_2O_3 \Longleftrightarrow 2NaI + Na_2S_4O_6 \qquad (ค.2)$$

สีเหลืองหรือสีส้ม ไม่มีสี

จากสมการ การเกิดโอโซน 1 โมลใช้ $Na_2S_2O_3$ 2 โมล

O_3	1	โมล	$Na_2S_2O_3$	2	โมล
O_3	48	กรัม	$Na_2S_2O_3$	2	โมล

จากการทดลองใช้ $Na_2S_2O_3$ 0.100 โมลาร์ ในการไทเทรต

O_3	48	กรัม	$Na_2S_2O_3$	20	ลิตร
O_3	1	กรัม	$Na_2S_2O_3$	20/48	ลิตร
O_3	1	มิลลิกรัม	$Na_2S_2O_3$	1/2.4	มิลลิลิตร

ดังนั้น

O_3 (มิลลิกรัม) = 2.4 ×ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ 0.100 โมลาร์ (มิลลิลิตร) (ค.3)

แต่ในการทดลอง $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้มีความเข้มข้นไม่เท่ากับ 0.100 โมลาร์ ดังนั้น

$$O_3 \text{ (มิลลิกรัม)} = \frac{2.4 \times \text{molarity ของ } Na_2S_2O_3 \text{ ที่ใช้} \times \text{ปริมาตร } Na_2S_2O_3 \text{ (มิลลิลิตร)}}{0.100 \text{ โมลาร์}} \qquad (ค.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองหาความเข้มข้นที่แท้จริงของ $Na_2S_2O_3$

การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เข้มข้น 0.1 โมลาร์
2. สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไอโอเดต เตรียมโดยชั่ง KIO_3 4.28 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตรเติมคลอโรฟอร์มประมาณ 3 หยด
3. สารละลายน้ำแป้ง เตรียมโดยละลายแป้ง 0.1 กรัมในน้ำกลั่นเล็กน้อย ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน ต้มให้เดือดนาน 1 นาที ทิ้งให้เย็น แล้วเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2-3 กรัมให้ละลาย

วิธีการทดลอง

1. ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตมา 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1 กรัมและกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ประมาณ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตทันที จนได้สารละลายที่มีสีชาอ่อน
4. เติมน้ำแป้ง 2 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป บันทึกปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้
5. ทำซ้ำอีกครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

น้ำหนักของ KIO_3 = 4.28 กรัม

ตาราง ค1. ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต

ครั้งที่	ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)
1	29.18
2	29.25
เฉลี่ย	29.215

การคำนวณ

จาก $IO_3^-(aq) + 6H_3O^+(aq) + 5I^-(aq) \longrightarrow 3I_2(aq) + 9H_2O(aq)$ (ค.5)

$6S_2O_3^{2-}(aq) + 3I_2(aq) \longrightarrow 3S_4O_6^{2-}(aq) + 6I^-(aq)$ (ค.6)

จะเห็นว่า KIO_3 1 โมล จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ $S_2O_3^{2-}$ 6 โมล

มวลโมเลกุลของ KIO_3 = 214 กรัม/โมล

ดังนั้นปริมาณเนื้อสาร KIO_3= $4.28/214 = 2\times10^{-2}$

ดังนั้น ในสารละลาย KIO_3 1000 มิลลิลิตร มีเนื้อสาร KIO_3 อยู่ 2×10^{-2} โมล

ในสารละลาย KIO_3 25 มิลลิลิตร มีเนื้อสาร KIO_3 อยู่ $(25\times2\times10^{-2})/1000$ โมล

$= 5\times10^{-4}$ โมล

แสดงว่าใช้ $S_2O_3^{2-} = 6\times5\times10^{-4}$ โมล $= 3\times10^{-3}$ โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง ปริมาตรเฉลี่ยของ $Na_2S_2O_3$ = 29.215 มิลลิลิตร

สารละลาย $Na_2S_2O_3$ 29.215 มิลลิลิตร มีเนื้อสารอยู่ 3×10^{-3} โมล

สารละลาย $Na_2S_2O_3$ 1000 มิลลิลิตร มีเนื้อสารอยู่ $(3\times10^{-3}\times1000)/29.215 = 0.1026$ โมล

ดังนั้น ความเข้มข้นของ $Na_2S_2O_3$ = 0.1026 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ง

การคำนวณค่าความดันย่อยของโอโซน

อัตราการไหลของออกซิเจน เท่ากับ 1 ลิตร/นาที จะมีความเข้มข้นของโอโซนเท่ากับ 475.20 มิลลิกรัม/ชั่วโมง

จากสูตรการคำนวณความดัน

$$P_{O_3} = x_{O_3} P \qquad (ง.1)$$

P_{O_3} = ค่าความดันย่อยของโอโซน (บรรยากาศ)

x_{O_3} = สัดส่วนโมลของโอโซน

P = ค่าความดันรวม (บรรยากาศ) = 1 บรรยากาศ

$$\text{โดยที่ } x_{O_3} = \frac{\text{โมล } O_3}{\text{โมลรวม}} = \frac{\text{โมล } O_3}{\text{โมล } O_3 + \text{โมล } O_2} \qquad (ง.2)$$

โมล O_3 : 0.4752 กรัม / ชั่วโมง . O_3 = 9.9×10^{-3} โมล / ชั่วโมง.O_3

โมล O_2 ที่เข้ามา : 1.00 ลิตร / นาที. O_2 = 60.00 ลิตร / ชั่วโมง. O_2

ปริมาตรของ ideal gas = 22.4 ลิตร / โมล

ดังนั้น โมล O_2 ที่เข้ามา = $(1/22.4)\times 60.0$ = 2.679 โมล / ชั่วโมง. O_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปฏิกิริยาการเกิดโอโซน $3\,O_2 \longrightarrow 2\,O_3$

$1.5\,O_2 \longrightarrow O_3$

O_3 9.9×10^{-3} โมล / ชั่วโมง .O_3 $= 1.5\times9.9\times10^{-3}$ โมล / ชั่วโมง .O_2

$= 1.485\times10^{-2}$ โมล / ชั่วโมง .O_2

O_2 ในแก๊สผสม $= 2.679 - (1.485\times10^{-2}) = 2.664$ โมล / ชั่วโมง .O_2

โมลรวม $= (1.485\times10^{-2}) + 2.664 = 2.679$ โมล

$x_{O_3} = (1.485\times10^{-2})/2.679 = 5.54\times10^{-3}$

$P_{O_3} = 5.54\times10^{-3}$ บรรยากาศ

ความดันย่อยของโอโซนที่อัตราการไหลออกซิเจนเท่ากับ 1 ลิตร/นาที เท่ากับ 5.54×10^{-3} บรรยากาศ ที่อัตราการไหลออกซิเจนอื่นๆก็คำนวณเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก จ

ค่าสภาวะต่างๆที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยเครื่องอะตอมมิกส์แอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

Atomic Absorption / Flame Emission Spectrophotometer

Flame condition

Flame	Air-C_2H_2	
Fuel	2.0	ลิตร / นาที
Oxidant	8	ลิตร / นาที
Burner	10	เซ็นติเมตร
Height	---	
Angle	---	

Measurement Condition

Single Process	integ hold	
Pre-Spray	3	วินาที
Integ time	5	วินาที
Repeat	1	
Max-N	1	
CV	99%	

Instrument Condition Pb

HC Lanp	#2	
HC Lamp	7	มิลลิแอมแปร์
Slit	0.3	นาโนเมตร
Mode	BGC	
WL	217	นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

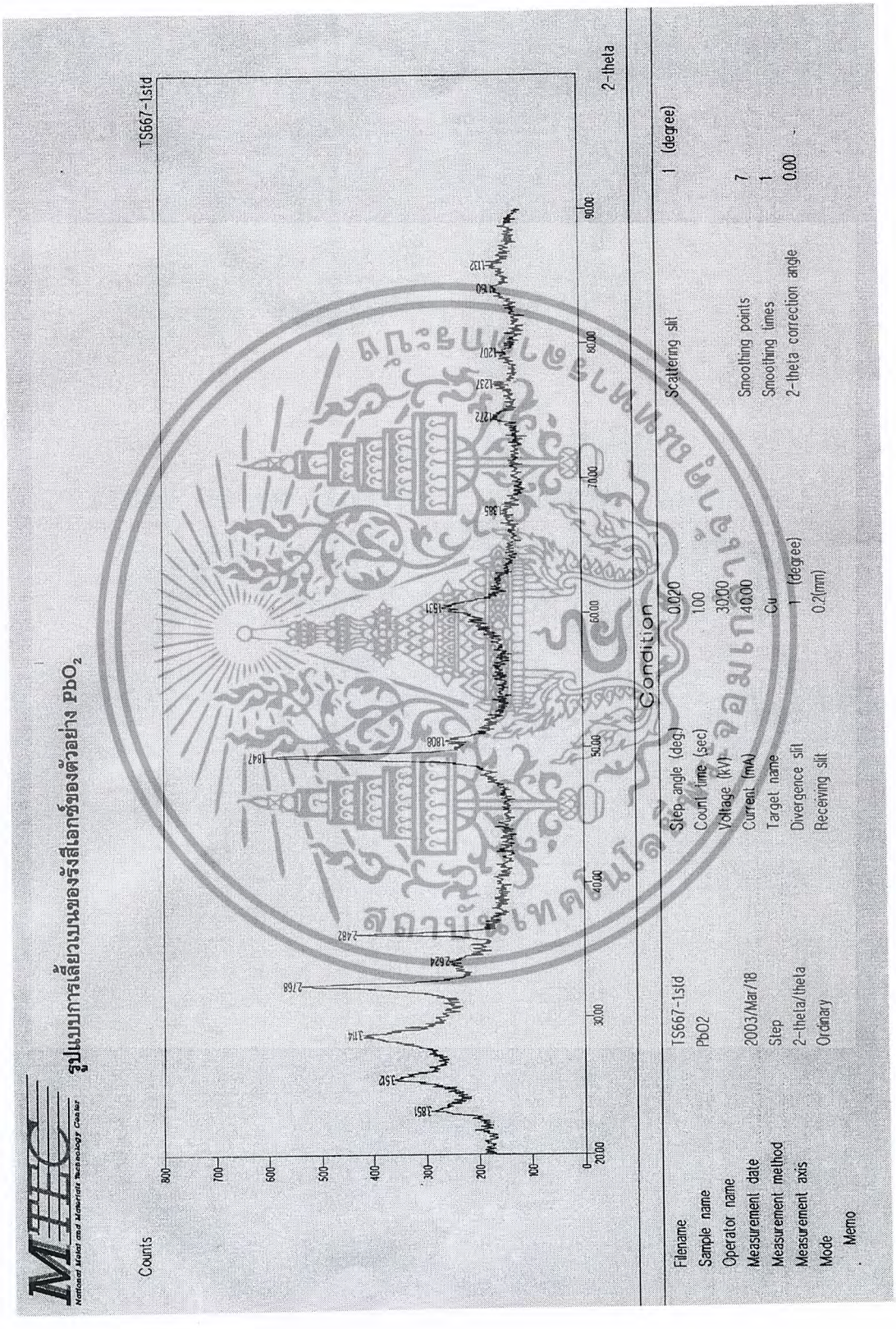
Instrument Condition Cd

HC Lanp	#2	
HC Lamp	7	มิลลิแอมแปร์
Slit	0.3	นาโนเมตร
Mode	BGC	
WL	228.8	นาโนเมตร

Analog Out

Response	Response 2	
Expansion	1	
Chart Speed	10	นาโนเมตร / นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ฉ

ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง PbO_2