

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีโอโซน



ฉัตรชยา ตันติเวชยานนท์
วันจักร โขจรตันชัย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42400
วัน, เดือน, ปี..... 20 พ.ศ. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**REMOVAL OF TRACE METALS FROM WASTEWATER BY
OZONATION**



**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**

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีโอโซนเนชั่น
โดย นางสาวฉัตรชยา ตันติเวชยานนท์
นายวันจักร โขครัตนชัย
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.โจโกะ เทเรซ่า อีโต้
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

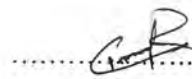
ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....กรรมการ
(ดร.โจโกะ เทเรซ่า อีโต้)


.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)


.....กรรมการ
(อ.รัตนฤดี เบญจางคประเสริฐ)


.....กรรมการ
(อ.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธี โอโซนเนชั่น

โดย นางสาวฉัตรชยา คันติเวชยานนท์

นายวันจักร โขครัตนชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา คร.โจโกะ เทเรซ่า ฮิโต้

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีสารเจือปนประเภทโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ สังกะสี เป็นต้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย สำหรับการบำบัดน้ำเสียในโครงการนี้ได้ใช้วิธี โอโซนเนชั่น เพื่อออกซิไดซ์โลหะหนักให้ตกตะกอนในรูปของ โลหะไฮดรอกไซด์ ($M(OH)_x$) โดยข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถตกตะกอนโลหะหนักต่างๆออกจากกันได้ โดยอาศัยแผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของโลหะแต่ละชนิดในการพิจารณาว่า pH ที่เหมาะสม อีกทั้งโลหะหนักดังกล่าวสามารถดึงกลับมาใช้ใหม่ได้ และ โอโซนจะไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในน้ำ

ในโครงการนี้ได้ดำเนินการทดลองการโอโซนเนชั่นของเหล็ก และนิกเกิล ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร โดยในการทดลองตอนแรกศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซน หรือ ความเร็วในการปั่นกววน จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ส่วนการทดลองในช่วงหลัง ทำโดยการพ่น โอโซน 237.60 มิลลิลิตร/ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า สามารถแยกเหล็กออกได้ที่ pH 4 และแยกนิกเกิลออกได้ที่ pH 7 โดยสามารถกำจัดเหล็กความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร ออกได้หมดภายในเวลา 6 นาที และสามารถคำนวณหาค่าอันดับ และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้เท่ากับ -0.0891 และ 1.64×10^{-1} ตามลำดับ ในการกำจัดนิกเกิล พบว่าสามารถกำจัดได้จากความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร เหลือ 0.0065 กรัม/ลิตร ในเวลา 42 นาที ที่ pH 7 และสามารถคำนวณหาค่าอันดับ และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้เท่ากับ -0.6812 และ 7.34×10^{-10} ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Removal of Trace Metals from Wastewater by Ozonation
By Ms. Chatchaya Tantiwatchayanon
Mr. Wanjack Chokrattanachai
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, nickel, cobalt, zinc etc. that are harmful to living organism. For treatment of such wastewater in this project use ozonation to oxidise heavy metals to make them precipitated as $M(OH)_x$. The advantages of this method are that heavy metals can be precipitated separately by using Potential – pH diagram by using determined pH value for each heavy metals, so that they can be recovered from wastewater for reuse and ozone will not contaminate water.

In this project, ozonation experiments were performed with iron and nickel in solution containing 0.1 g/l of each metals. As preliminary experiment, we studied the variables that can affect oxidation reaction. It was found that increasing the ozone concentration or agitation speed, the oxidation reaction increased. From the experiments with 237.60 mg/h of ozone injection, it was found that iron and nickel could be removed at pH 4 and 7 respectively. All iron was removed after 6 minutes of ozonation and the reaction order and reaction rate constant for Fe oxidation – precipitation reaction were -0.0891 and 1.64×10^{-4} respectively. In case of nickel, it was found that Ni^{2+} concentration was decreased from 0.1 g/l to 0.0065 g/l after 42 minutes at pH 7. The reaction order and reaction rate constant for Ni oxidation – precipitation reaction were -0.6812 and 7.34×10^{-10} respectively.

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 มุลเหตุจงใจ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการทำงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การเกิดออกซิเดชันทางเคมี.....	4
2.1 แอคทิวิตีและสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี.....	4
2.2 สมการของเนิสต์.....	6
2.3 แผนภูมิความต่างศักย์.....	7
บทที่ 3 การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง.....	13
3.1 การวิเคราะห์ทางเคมี.....	14
3.2 การวัดปริมาณไอโชนที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.3 การออกซิเดชันเหล็ก และนิกเกิลด้วยไอโชน.....	23
บทที่ 4 สรุปและวิจารณ์การทดลอง.....	46
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก.....	50
ภาคผนวก ข.....	52
ภาคผนวก ค.....	55
ภาคผนวก ง.....	57
ภาคผนวก จ.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบเหล็ก - น้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	8
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH ของระบบนิกเกิล - น้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	9
ตารางที่ 3.1 การดูดกลืนแสงในสารละลายเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	16
ตารางที่ 3.2 การดูดกลืนแสงในสารละลายนิกเกิล ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	19
ตารางที่ 3.3 ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ที่ใช้ในการไตเตรต และปริมาณของไอโชนที่สังเคราะห์ได้.....	22
ตารางที่ 3.4 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในสารละลายตัวอย่าง ที่เวลาต่างๆเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของออกซิเจน.....	27
ตารางที่ 3.5 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในสารละลายตัวอย่าง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วของการปั่นกววน.....	29
ตารางที่ 3.6 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในสารละลายตัวอย่าง ที่เวลาต่างๆเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH.....	32
ตารางที่ 3.7 ค่าการดูดกลืนแสงของนิกเกิล ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ในสารละลายตัวอย่าง ที่เวลาต่างๆเมื่อทำการ เปลี่ยนแปลงค่า pH.....	33
ตารางที่ 3.8 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และนิกเกิล ที่ ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตรในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 4....	36
ตารางที่ 3.9 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็กที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และนิกเกิล ที่ ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตรในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 3.5..	37
ตารางที่ 3.10 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็กที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และนิกเกิล ที่ ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตรในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 3...	37
ตารางที่ 3.11 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็กที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และนิกเกิล ที่ ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตรในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 2.7..	38
ตารางที่ 3.12 ค่า $\log V$ ที่ pH 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4 สำหรับเหล็ก.....	43
ตารางที่ 3.13 ค่า $\log V$ ที่ pH 6 และ 7 สำหรับนิกเกิล.....	44
ตารางที่ 3.14 ค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาสำหรับเหล็กและนิกเกิล.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	2
รูปที่ 2.1	แผนภูมิความต่างศักย์ – pH ของระบบเหล็ก – น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร.....	9
รูปที่ 2.2	แผนภูมิความต่างศักย์ – pH ของระบบนิกเกิล – น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร... ..	10
รูปที่ 2.3	แผนภูมิความต่างศักย์ – pH ของระบบนิกเกิล – น้ำ ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 1 ถึง 10^6 โมลาร์	11
รูปที่ 3.1	กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์เหล็ก.....	17
รูปที่ 3.2	กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์นิกเกิล.....	19
รูปที่ 3.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจน กับความดันย่อยของ โอโซน.....	22
รูปที่ 3.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กและเวลาที่อัตราการไหลออกซิเจนต่างๆ.....	27
รูปที่ 3.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กและเวลาที่ความเร็วการปั่นกววนต่างๆ.....	30
รูปที่ 3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กกับเวลาที่ค่า pH ต่างๆ.....	33
รูปที่ 3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH ต่างๆ.....	34
รูปที่ 3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือ นิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH 4.....	39
รูปที่ 3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือ นิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH 3.5.....	39
รูปที่ 3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือ นิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH 3.....	40
รูปที่ 3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือ นิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH 2.7.....	40
รูปที่ 3.12	เส้นแนวโน้มระหว่างความเข้มข้นของเหล็กกับเวลา.....	42
รูปที่ 3.13	เส้นแนวโน้มระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลกับเวลา.....	43
รูปที่ 3.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log V กับ pH ของเหล็ก.....	44
รูปที่ 3.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log V กับ pH ของนิกเกิล.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

a	ความว่องไวของสาร
C	ความเข้มข้น, โมล/ลิตร
C^0	ความเข้มข้นที่สภาวะมาตรฐาน = 1 โมล/ลิตร
E	ความต่างศักย์, โวลต์ (สมการที่ 2.8)
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 96,458 คูลอมป์/โมล
k	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมล ⁽ⁿ⁻¹⁾ .ลิตร ⁽ⁿ⁻¹⁾ .นาที่ ⁻¹ (สมการที่ 4.2)
k_0	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมล ⁽ⁿ⁻¹⁾ .ลิตร ⁽ⁿ⁻¹⁾ .นาที่ ⁻¹
k_1, k_2	ค่าคงที่
m, n	อันดับของปฏิกิริยา
n	จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในครึ่งปฏิกิริยา
O_2	ความเข้มข้นของ โอโซน, มิลลิกรัม/ลิตร
Po_3	ความดันย่อยของ โอโซน, atm
R	ค่าคงตัวของแก๊ส, แคลอรี/โมล-เคลวิน
T	อุณหภูมิ, เคลวิน
t	เวลา, นาที่
V	อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย, โมล/ลิตร-นาที่ (สมการที่ 3.5)

อักษรกรีก

ΔG	พลังงานอิสระ, กิโลจูล/โมล
α, β, γ และ δ	สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพัทธ์ของสารชนิดต่างๆ
γ_0	ค่าสัมประสิทธิ์ความว่องไว, ไม่มีหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1) มลเหตุจูงใจ

การกำจัดโลหะออกจากน้ำเสียที่ได้จากโรงงาน เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากโลหะจะทำให้เกิดมลพิษที่รุนแรงและ ยังมีผลต่อทรัพยากรโลหะที่กำลังจะหมดไปในอนาคตด้วย

โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ทำการพัฒนาวิธีการบำบัดแบบพิเศษเป็นจำนวนมากเพื่อนำไปใช้ในการกำจัดโลหะออกจากน้ำเสียก่อนที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม [1] โดยกระบวนการทั้งหมดนั้น การตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายที่สุด เนื่องจากวิธีการนี้ใช้งานง่ายและมีราคาถูก

วิธีการนำโลหะหนักออกมาจากสารละลายในปัจจุบัน คือ การทำให้เป็นกลาง และการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ เมื่อเรามีโลหะหลายๆชนิดรวมกัน โลหะเหล่านั้นจะตกตะกอนรวมกันเป็น $M(OH)_2$ ซึ่งจะไม่สามารถแยกเอาตะกอนแต่ละชนิดออกมาได้ แต่ถ้า เราทำการ ออกซิไดซ์โลหะหนักเหล่านั้นก่อน และตกตะกอนเป็น $M(OH)_3$ เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกออกซิไดซ์ไม่เท่ากัน เราจะสามารถแยกออกเป็นโลหะเดี่ยวๆแต่ละชนิดได้ การใช้โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ที่จะตกตะกอนโลหะหนักจากสารละลาย เพราะโอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูง และยิ่งไปกว่านั้น โอโซนจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษกับน้ำ ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม เราสามารถกำจัดเชื้อโรค และทำการเอาเหล็กออกจากน้ำในเวลาเดียวกัน แต่เงื่อนไขในการเกิดการออกซิไดซ์ของโลหะหนักแต่ละชนิด ยังไม่เป็นที่เข้าใจกันดีนัก

1.2) จุดประสงค์ของโครงการ

ศึกษาและพัฒนาวิธีการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยวิธีออกซิไดซ์ด้วยโอโซน

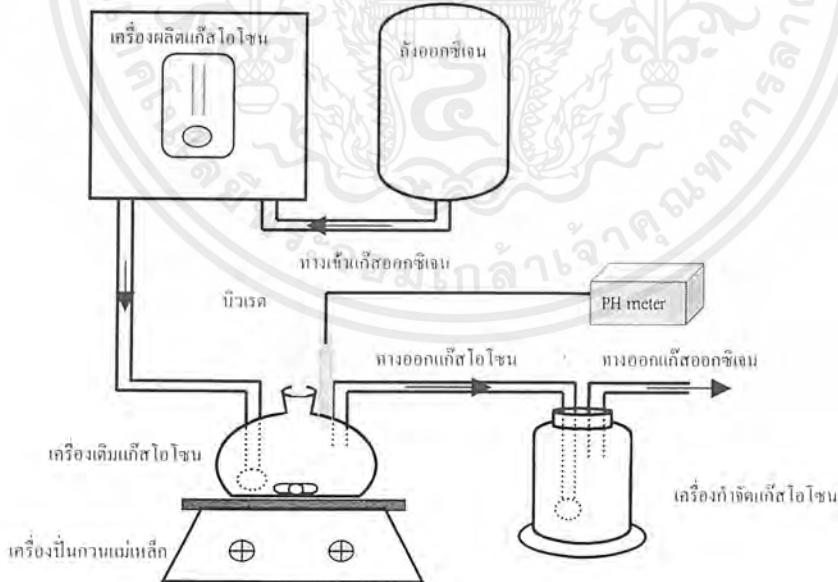
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3) ขอบเขตของโครงการ

- 1) ศึกษาหลักการออกซิไดซ์โลหะหนักด้วยโอโซน
- 2) ศึกษาและทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการแยกเหล็กและนิกเกิลออกจากน้ำเสียด้วยวิธีออกซิไดซ์ด้วยโอโซน

1.4) ขั้นตอนการทำงาน

- 1) ศึกษาหลักการออกซิไดเซชันของโลหะหนัก และการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์
- 2) หาอัตราการผลิตโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน โดยใช้อากาศและออกซิเจน
- 3) ทดลองแยกเหล็กจากน้ำเสีย
- 4) ทดลองแยกนิกเกิลจากน้ำเสีย



รูปที่ 1.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจหลักการกำจัด โลหะหนักด้วยวิธีออกซิไดซ์ด้วยโอโซน และสามารถแยกเหล็กและนิเกิลออกจากน้ำเสียได้ รวมถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่ม อีกทั้งยังเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาใช้แยกโลหะหนักชนิดอื่นๆ ได้

นอกจากนี้ผู้ดำเนินโครงการยังได้รับประโยชน์ในด้านการทำงานเป็นกลุ่ม การวางแผน และการควบคุมการทำงานให้ลุล่วงตามแผนงานที่กำหนดไว้ได้

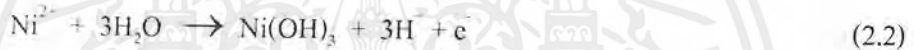
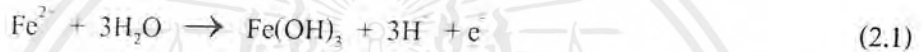


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี

การเกิดออกซิเดชันทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี คุณสมบัติของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ pH และความรุนแรงของสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี ของเหล็กและนิกเกิลแสดงด้วยสมการเคมีข้างล่าง [8], [9]



การศึกษาความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ ต้องอาศัยสมการของเนิสต์ (Nernst's equation) และค่าการละลาย (Solubility) ของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบได้ว่าโลหะ ไอออน หรือสารประกอบที่เกิดจากการออกซิเดชันทางเคมีจะมีเสถียรภาพในสภาวะใด จากแผนภูมิของความต่างศักย์ - pH (Potential - pH diagram) บางทีเรียกแผนภูมินี้ว่า แผนภูมิปูแบ็ก (Pourbaix diagram) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไป

2.1 แอคติวิตีและสัมประสิทธิ์แอคติวิตี [7]

พิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยทั่วไป



โดยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิก พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปทางขวา นั่นคือ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{a_c^\gamma a_d^\delta}{a_a^\alpha a_b^\beta} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	ΔG	=	พลังงานอิสระ, กิโลจูล / โมล
	R	=	ค่าคงตัวของแก๊ส, แคลอรี / โมล - เคลวิน
	T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน
	a_A, a_B, a_C , และ a_D	=	แอกติวิตีของสารชนิด A, B, C และ D ตามลำดับ
	α, β, γ และ δ	=	สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารชนิด A, B, C และ D ตามลำดับ

ที่สภาวะสมดุล ΔG มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (2.4) จะลดรูปเหลือ

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{eq} \quad (2.5)$$

เมื่อ

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

ในสมการ (2.4) สำหรับแก๊สอุดมคติที่อยู่ในสภาวะมาตรฐานมีความดันไอย่อย (P^0) เท่ากับ 1 บาร์ ค่าแอกติวิตีจะเท่ากับ P/P^0 สำหรับสารประกอบของสารละลายอุดมคติที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มข้น (C^0) เท่ากับ 1 โมลต่อลิตร ค่าแอกติวิตีจะเท่ากับ C/C^0 สำหรับของแข็งและของเหลวบริสุทธิ์นั้นจะอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นค่าแอกติวิตีจะเท่ากับ 1 และสำหรับตัวทำละลายในสารละลายอุดมคติ จะถูกสมมุติว่าเป็นของเหลวบริสุทธิ์ที่มีค่าแอกติวิตีเท่ากับ 1 เช่นกัน

ในการใช้สมการที่ (2.4), (2.5) และ (2.6) สำหรับการคำนวณในกรณีที่สารละลายไม่ใช่สารละลายอุดมคติหรือแก๊สผสมที่ไม่เป็นอุดมคติจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (Activity coefficient, γ) เพื่อคำนวณค่าแอกติวิตีตามสมการที่ (2.7)

$$a = \gamma C/C^0 \quad (2.7)$$

เมื่อ	γ	=	ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (ไม่มีหน่วย)
	C	=	ความเข้มข้น, โมล / ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C^0 = ความเข้มข้นที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 1 โมล / ลิตร

เนื่องจาก $C^0 = 1$ โมล / ลิตร ทำให้ค่าแอกติวิตีมีค่าเท่ากับ γC แต่ต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าแอกติวิตีจะต้องไม่มีหน่วยไม่ว่าจะคำนวณโดยใช้ความเข้มข้นหรือความดันย่อยก็ตาม

2.2 สมการของเนิสต์ (Nernst's equation)

จากงานทางไฟฟ้าที่ทำโดยเซลล์กัลวานิก มีค่าเท่ากับความต่างศักย์คูณด้วยประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทที่ขั้วไฟฟ้าใดๆ สำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน n โมล ประจุที่ถ่ายเทก็คือ nF ดังนั้นงานทางไฟฟ้าในหน่วยจูลเท่ากับ nFE ปริมาณงานสูงสุดที่ทำโดยเซลล์กัลวานิก คือค่าของ nFE ภายใต้เงื่อนไขที่กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้าผันกลับได้ เนื่องจากงานทางไฟฟ้าเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งของงานนอกเหนือจากงานของการขยายหรือหดตัวที่มีในเซลล์กัลวานิกแบบดั้งเดิม ตามหลักของพลังงานอิสระจากถ้าวได้ว่า

$$\Delta G = -nFE \quad (2.8)$$

เมื่อ E = ความต่างศักย์, โวลต์
 n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในปฏิกิริยา
 F = ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96,493 คูลอมน์ [2]

ดังนั้นจากสมการที่ (2.4) จะได้

$$-nFE = \Delta G^0 + RT \ln K_{eq} \quad (2.9)$$

ที่สภาวะมาตรฐาน

$$E^0 = -\Delta G^0 / nF \quad (2.10)$$

แทนค่ากลับลงในสมการที่ (2.9) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln K_{eq} \quad (2.11)$$

ซึ่งเรียกสมการที่ (2.11) ว่า สมการของเนิสต์

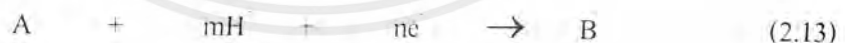
เมื่อรวมค่าคงที่เข้าด้วยกันและเปลี่ยนลอการิทึมธรรมชาติเป็นลอการิทึมฐานสิบ สมการที่ (3.12) สำหรับความต่างศักย์ (ในหน่วย โวลต์) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กลายเป็น

$$E = E^0 - \frac{0.0592}{n} \log K_{eq} \quad (2.12)$$

โดยค่าความต่างศักย์ที่สภาวะมาตรฐาน (E^0) สามารถหาได้จากตารางในภาคผนวก ก

2.3 แผนภูมิความต่างศักย์

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



สามารถคำนวณหาความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_B}{a_A a_{H^+}^m} \quad (2.14)$$

เมื่อค่าแอกติวิตีของ A และ B มีค่าเท่ากัน จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = E^0 - 2.303 \frac{mRT}{nF} \text{pH} \quad (2.15)$$

คังนั้นศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะถูกพิจารณาว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ pH ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ -59.2 มิลลิโวลต์ต่อหน่วย pH ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตารางค่า E^0 และ ΔG^0 แสดงในตาราง ก.1 และ ก.2 ของภาคผนวก ก ตามลำดับ

การพิจารณาแผนภูมิความต่างศักย์ – pH

ในการทดลองครั้งนี้ จะทำการออกซิเดชันเหล็กและนิกเกิลที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร เมื่อใช้สมการของเนินสต์ และ สมการพลังงานอิสระของกิบส์ คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ และค่า pH ของเหล็กและนิกเกิล ได้ผลดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งวิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

จากตารางที่ 2.1 และ 2.2 สามารถนำมาสร้างแผนภูมิความต่างศักย์ – pH ของระบบเหล็ก – น้ำ และ ระบบ นิกเกิล – น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร ได้ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2

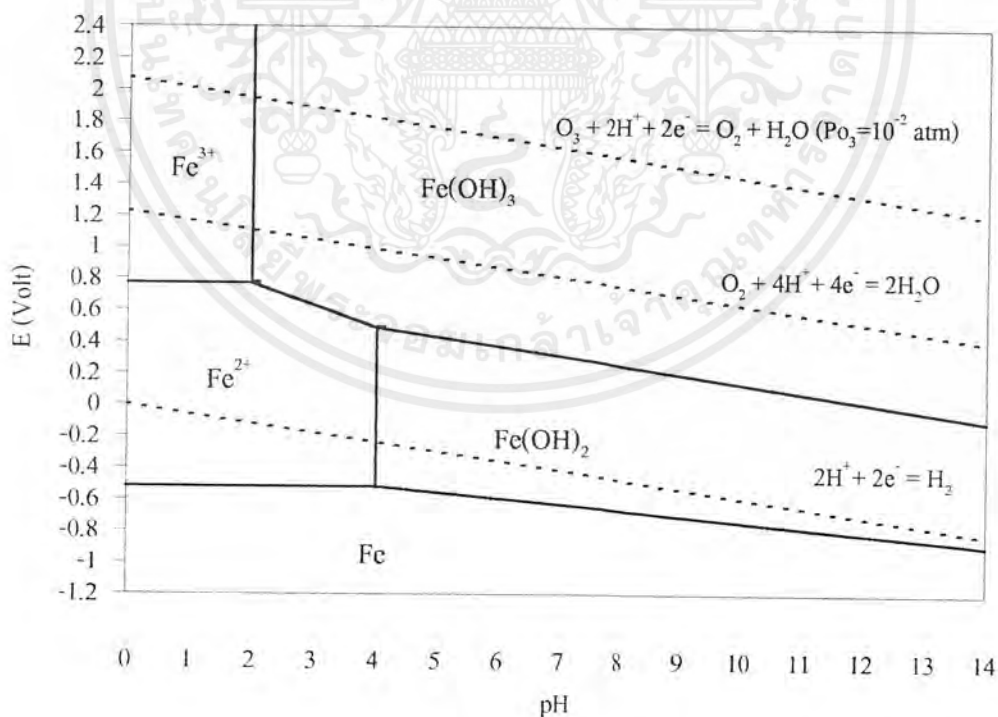
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ กับ pH ของระบบเหล็ก – น้ำ ที่อุณหภูมิ 25 °C [4]

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$	$E = -0.44 + 0.0295 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	$E = 0.771$
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	$E = 1.35 - 0.1773 \text{pH} - 0.0591 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O}$	$E = -0.0635 - 0.0591 \text{pH}$
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 2.6522 - 0.5 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 0.2817 - 0.0591 \text{pH}$
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ = \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 1.1426 - 0.33 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	$E = -0.0591 \text{pH} - 0.0295 \log P_{\text{H}_2}$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.228 - 0.0591 \text{pH} + 0.0148 \log P_{\text{O}_2}$
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (P_{\text{O}_3} / P_{\text{O}_2})$ $+ 0.0591 \log a_{\text{H}^+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

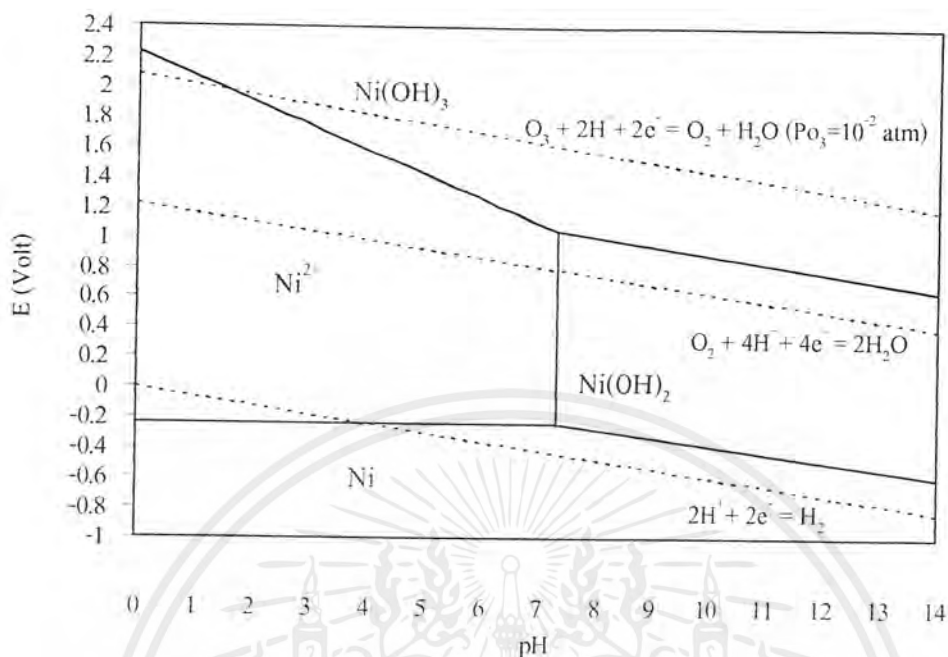
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ กับ pH ของระบบนิเกิล – น้ำที่อุณหภูมิ 25°C [4]

ปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่าง E-pH
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	$E = -0.236 + 0.0295 \log a_{\text{Ni}^{2+}}$
$\text{Ni(OH)}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Ni} + 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 0.14 - 0.0591 \text{ pH}$
$\text{Ni(OH)}_2 + 2\text{H}^+ = \text{Ni}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 5.93 - 0.5 \log a_{\text{Ni}^{2+}}$
$\text{Ni(OH)}_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Ni}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	$E = 2.232 - 0.1773 \text{ pH}$
$\text{Ni(OH)}_3 + \text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Ni(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 1.478 - 0.0591 \text{ pH}$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	$E = -0.0591 \text{ pH} - 0.0295 \log \text{Ph}_2$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	$E = 1.228 - 0.0591 \text{ pH} + 0.0148 \log \text{Po}_2$
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E = 2.0755 + 0.0296 \log (\text{Po}_3 / \text{Po}_2)$ $+ 0.0591 \log a_{\text{H}^+}$



รูปที่ 2.1 แผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบเหล็ก – น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของระบบนิกเกิล - น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร [4]

ในแผนภูมิความต่างศักย์ - pH เส้นตรงที่ลากแต่ละเส้น จะแสดงเงื่อนไขของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารประกอบแต่ละชนิด ส่วนเส้นประในตำแหน่งบน กลาง และล่างจะแสดงขีดจำกัดการละลายทางเทอร์โมไดนามิกส์ ของ $O_3 \rightarrow O_2$, $O_2 \rightarrow H_2O$ และ $H_2O \rightarrow H_2$ ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

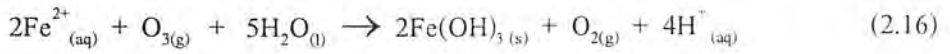
1. พื้นที่เหนือเส้น $O_3 \rightarrow O_2$ หมายถึงสถานะเสถียรของโอโซน
2. พื้นที่ระหว่างเส้น $O_3 \rightarrow O_2$ และ $O_2 \rightarrow H_2O$ หมายถึงสถานะเสถียรของออกซิเจน
3. พื้นที่ระหว่างเส้น $O_2 \rightarrow H_2O$ และ $H_2O \rightarrow H_2$ หมายถึงสถานะเสถียรของน้ำ
4. พื้นที่ใต้เส้น $H_2O \rightarrow H_2$ หมายถึงสถานะเสถียรของไฮโดรเจน

พิจารณารูปที่ 2.1 แผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของระบบเหล็ก - น้ำที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร สามารถสรุปได้ดังนี้

1. Fe^{2+} จะเสถียรภายใต้ pH ต่ำกว่า 4
2. การออกซิไดซ์ Fe^{2+} เป็น $Fe(OH)_3$ จะเกิดขึ้นระหว่าง pH 2 - 4
3. การออกซิไดซ์ Fe^{2+} โดยโอโซนสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

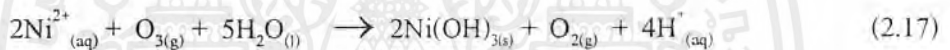
Fe (II) จะถูกออกซิไดซ์และตกตะกอนด้วยโอโซน ดังสมการที่ (2.16)



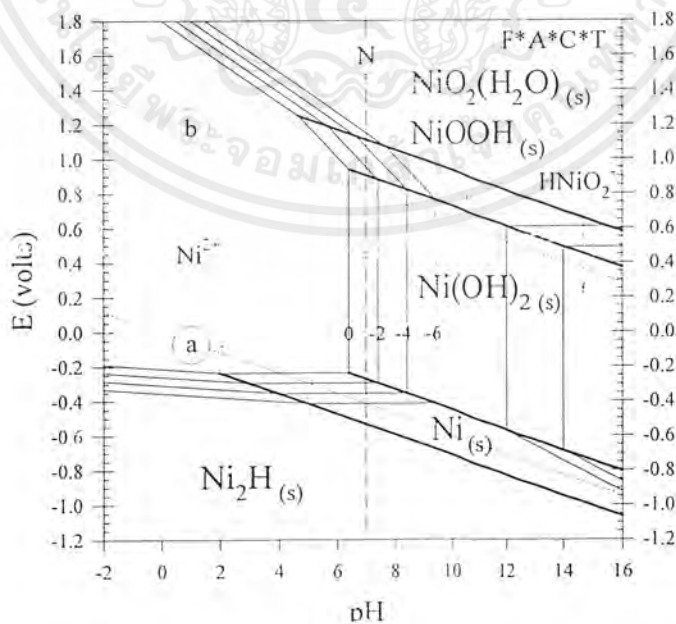
พิจารณารูปที่ 2.2 แผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของระบบนิกเกิล - น้ำที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร สามารถสรุปได้ดังนี้

1. Ni^{2+} จะเสถียรภายใต้ pH ต่ำกว่า 7.3
2. การออกซิไดซ์ Ni^{2+} เป็น $\text{Ni}(\text{OH})_2$ จะเกิดขึ้นระหว่าง pH 0 - 7.3
3. การออกซิไดซ์ Ni^{2+} โดยโอโซนสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$\text{Ni}(\text{II})$ จะถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วด้วยโอโซน และจะตกตะกอนอยู่ในรูป $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ดังสมการที่ (2.17) [4]



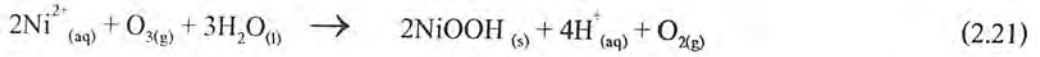
ในตำราบางเล่ม [6] ได้เสนอแผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของระบบ นิกเกิล - น้ำ ที่แตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของระบบ นิกเกิล - น้ำ ที่ความเข้มข้น ตั้งแต่ 1 ถึง 10^{-6} M [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 พบว่าเมื่อนิกเกิลถูกออกซิไดซ์ เป็น Ni(II)แล้ว จะเกิดการตกตะกอนอยู่ในรูป NiOOH ดังสมการที่ (2.21)



ซึ่งแตกต่างจากตารางที่ 2.2 ดังนั้นจะทำการตรวจสอบในโอกาสต่อไป ว่าตะกอนที่เกิดขึ้นนั้นเป็น NiOOH หรือ Ni(OH)₂



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินการทดลอง และผลการทดลอง

3.1) ขั้นตอนการทดลอง

แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การวัดปริมาณ โอโซนที่ใช้ในการทดลอง
2. การออกซิไดซ์ เหล็ก และ นิกเกิล ด้วยโอโซน

สารละลาย และขั้นตอนการเตรียมสารละลายทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2 % wt โดยละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์จำนวน 20.00 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
2. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1000 โมลาร์ โดยละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 25.00 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน (สำหรับการทดลองหาความเข้มข้นที่แน่นอนแสดงในภาคผนวก จ)
3. สารละลายเหล็ก (II) ซัลเฟต (Stock solution) 0.10 กรัมต่อลิตร เตรียมโดยชั่ง $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5000 กรัม ละลายในน้ำกลั่น หยดกรดซัลฟูริก 2 หยด แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
4. สารละลายนิกเกิล (II) ซัลเฟต (Stock solution) 0.10 กรัมต่อลิตร เตรียมโดยชั่ง $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.4500 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
5. สารละลายผสมเหล็ก (II) ซัลเฟต และนิกเกิล (II) ซัลเฟต (Stock solution) 0.10 กรัมต่อลิตร เตรียมโดยชั่ง $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5000 กรัม และ $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.4500 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.0000 โมลาร์ เตรียมโดย ละลาย NaOH pellet ประมาณ 40 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
7. กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.0000 โมลาร์ เตรียมโดยนำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 % โดยน้ำหนัก 36.75 มิลลิลิตรมาเจือจางโดยเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สารละลายโซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 1.0000 โมลาร์ เตรียมโดยชั่ง $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ประมาณ 13.60 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
9. สารละลาย 1,10 – Phenanthroline ความเข้มข้น 0.25 % โดยน้ำหนัก เตรียมโดย ชั่ง 1,10 – Phenanthroline ประมาณ 0.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
10. สารละลาย dimethyl glyoxime เตรียมโดยชั่ง dimethyl glyoxime ประมาณ 0.50 กรัม ละลายในสารละลายแอมโมเนีย 250.00 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500.00 มิลลิลิตร
11. สารละลายแอมโมเนียเข้มข้น
12. คลอโรฟอร์ม
13. กรดซिटริก

การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์ทางเคมี (Chemical analysis)

ในการทดลอง มีการวิเคราะห์สาร 3 ชนิด ได้แก่ ไอโซน เหล็ก และนิกเกิล

• การวิเคราะห์ปริมาณ ไอโซน

1) การไตเตรต

- 1.1) เมื่อทำการผ่านไอโซนในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ จะเกิดปฏิกิริยาเป็นสารละลายสีเหลืองใส นำสารละลายที่ได้ มาไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1000 โมลาร์ จนกระทั่งสีเหลืองหายไป
- 1.2) บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ เพื่อไปคำนวณหาปริมาณ ไอโซนต่อไป

2) การคำนวณหาปริมาณไอโซน

2.1) การออกซิไดซ์สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ด้วยไอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ 6405 UV/Vis ของ JENWAY
2. ขวดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด
3. ปิเปตต์ขนาด 1.00, 2.00 และ 5.00 มิลลิลิตร

วิธีการทดลองทำกราฟมาตรฐานของเหล็ก

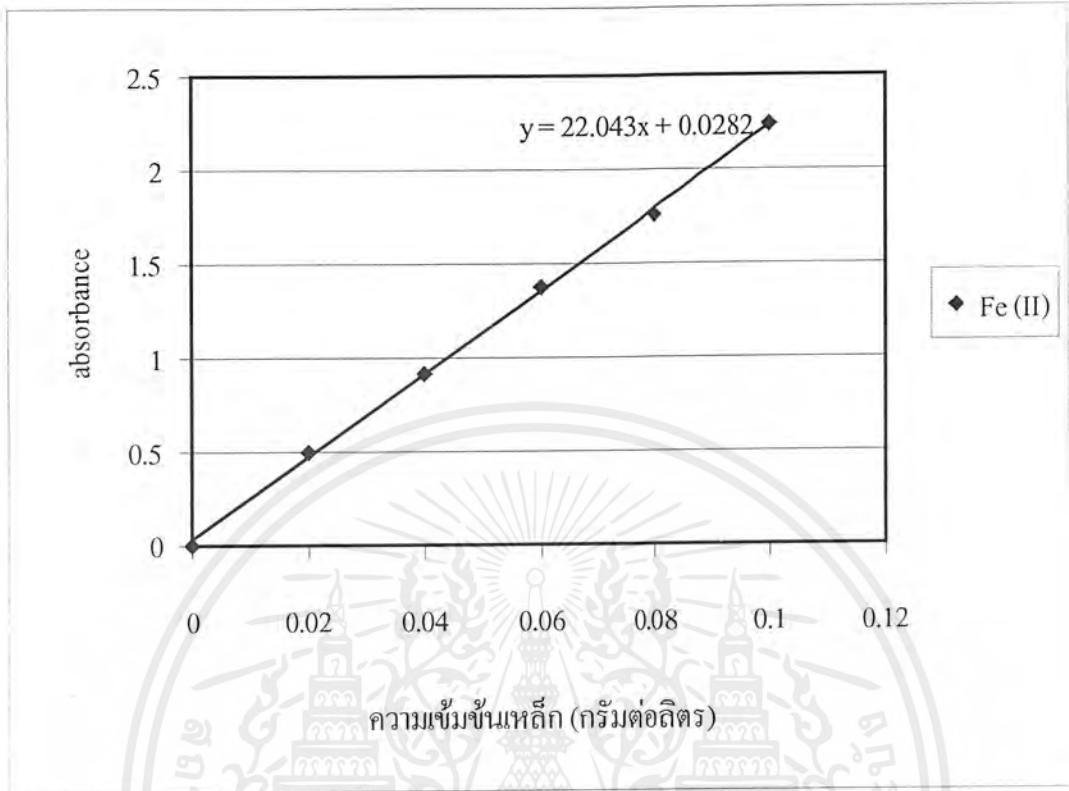
- 1) สารละลายมาตรฐานเหล็กมา 10.00 มิลลิลิตร เติมสารละลาย โซเดียมอะซิเตท ให้สารละลายมีค่า pH อยู่ระหว่าง 3-6
- 2) เติมสารละลาย 1,10 - Phenanthroline 4.00 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร
- 3) วัดค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร
- 4) ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 1-3 แต่ ปิเปตต์สารละลายเหล็กมา 20.00, 30.00, 40.00 และ 50.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ
- 5) สารละลายเบสลงก์ เตรียมเหมือนกันแต่ไม่ต้องใส่สารละลายเหล็ก
- 6) นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.1 การดูดกลืนแสงในสารละลายเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของเหล็ก (กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
0.02	0.498
0.04	0.915
0.06	1.373
0.08	1.757
0.10	2.239

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 กราฟการวิเคราะห์เหล็ก

- การวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลโดยวิธีคัลเลอร์ิเมตรี (Colorimetry) [3]

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายนิกเกิล (II) ซัลเฟต 0.10 กรัมต่อลิตร
2. สารละลาย dimethyl gloximine
3. สารละลายแอมโมเนียเข้มข้น
4. คลอโรฟอร์ม
5. กรดซิติริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ 6405 UV/Vis ของ JENWAY
2. กรวยแยก
3. ขวดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด
4. ปิเปตต์ขนาด 1.00, 2.00, 5.00 และ 10.00 มิลลิลิตร

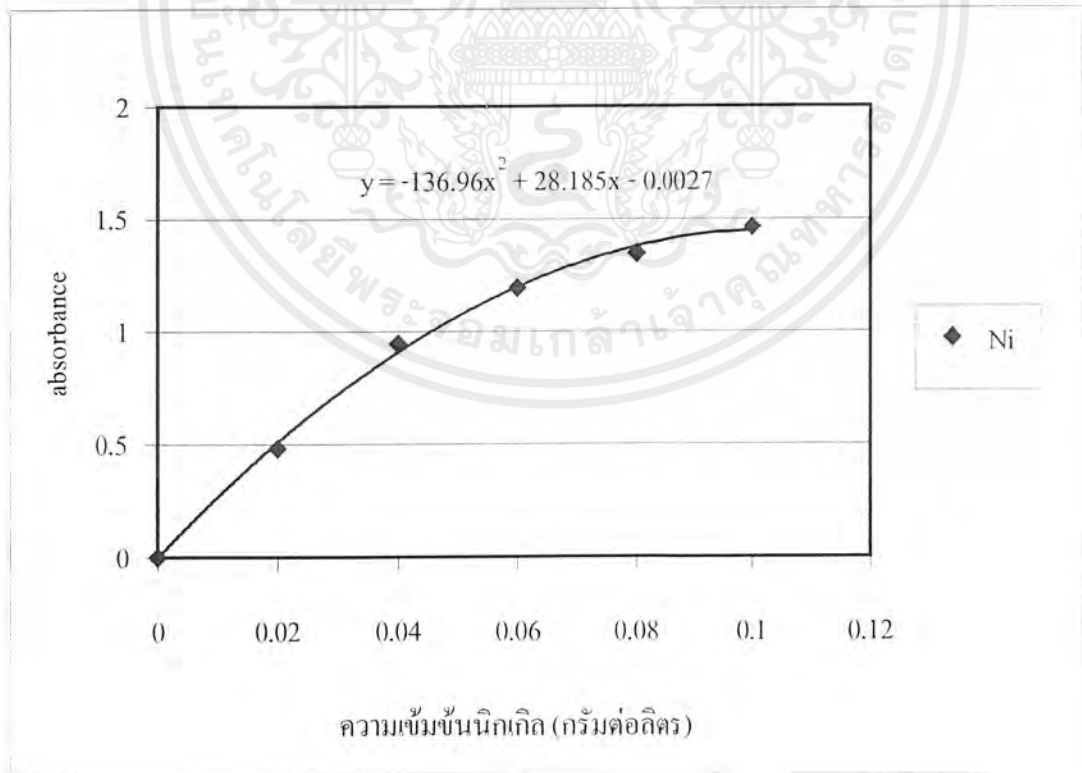
วิธีการทดลองทำกราฟมาตรฐานของนิกเกิล

- 1) ปิเปตต์สารละลายมาตรฐานนิกเกิลมา 10.00 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร
- 2) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1) มา 10.00 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ซึ่งมีน้ำกลั่นอยู่ 90.00 มิลลิลิตร
- 3) เติมกรดซัลฟูริก 5.00 กรัม
- 4) เติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นจนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 7.5 เทใส่ในกรวยแยก
- 5) เติมสารละลาย dimethyl glyoxime 20.00 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 1-2 นาที แล้วเติมคลอโรฟอร์ม 12.00 มิลลิลิตร เขย่า แล้วปล่อยให้สารละลายแยกกัน
- 6) แยกชั้นคลอโรฟอร์มสีแดงออกมา
- 7) สกัดอีกครั้งโดยเติมคลอโรฟอร์มอีก 12.00 มิลลิลิตร เขย่า จะได้ชั้นคลอโรฟอร์มสีแดงออกมา
- 8) นำไปอ่านค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร
- 9) ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่ ปิเปตต์สารละลายนิกเกิลมา 20.00, 30.00, 40.00 และ 50.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ
- 10) สารละลายเบลงก์ เตรียมเหมือนกันแต่ไม่ต้องใส่สารละลายนิกเกิล
- 11) นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.2 การดูดกลืนแสงในสารละลายนิกเกิล ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของนิกเกิล (กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
0.02	0.482
0.04	0.946
0.06	1.192
0.08	1.344
0.10	1.462



รูปที่ 3.2 กราฟการวิเคราะห์นิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2 การวัดปริมาณไอโซนที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองต้องการที่จะตกตะกอนเหล็กและนิกเกิลให้หมดภายในเวลาที่เร็วขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการวัดหาปริมาณ ไอโซนที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลองเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ภายในเวลาที่ต้องการ ด้วยวิธีการทางเคมีซึ่งเรียกว่า ไอโอดิเมทรี (Iodometry) โดยมีหลักการคือใช้สารละลายที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับไอโซน เช่น สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ทำให้เกิดไอโอดีน จากนั้นสามารถหาปริมาณไอโซนได้โดย การไตเตรตกับสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไทโอซัลเฟต ในการวัดปริมาณไอโซนนั้น จะทำการกำหนดเงื่อนไขและค่าตัวแปรต่างๆ เช่นเดียวกับเงื่อนไขต่างๆในการทำการทดลองออกซิไดซ์ โลหะเหล็กและนิกเกิลโดย

- 1) จะใช้ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ให้เท่ากับปริมาณสารละลายเหล็กและนิกเกิลที่ใช้ในการทำการทดลองออกซิไดซ์ คือ 500 มิลลิลิตร
- 2) กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็กเพื่อเป็นช่วยเพิ่มอัตราการละลายของไอโซนในน้ำด้วยเช่นเดียวกับการทดลองออกซิไดซ์เหล็กและนิกเกิล

จากนั้นจะทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 ลิตร ต่อนาที เพื่อที่จะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้าเครื่องของออกซิเจนกับปริมาณ ไอโซนที่ผลิตขึ้นได้ว่าจะมีความสัมพันธ์อย่างไร ซึ่งจะจัดอุปกรณ์ ให้เป็นดังรูปที่ 1.1

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2 % wt
2. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1000 โมลาร์

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผลิตไอโซน และชุดอุปกรณ์เติมไอโซน
2. ถังออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แท่งแม่เหล็ก
4. เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
5. นาฬิกาจับเวลา
6. บิวเรต

วิธีการทดลอง

1) การดูดซึมไอโชน

- 1.1) ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 1.1
 - 3.1) ผ่านออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตไอโชน ด้วยอัตราการไหล 0.5 ลิตร ต่อนาที
 - 3.2) เปิดเครื่องกวนด้วยอัตราการหมุน 500 รอบต่อนาที
 - 3.3) เปิดสวิทช์เครื่องผลิตไอโชน โดยเลือกที่อัตราการผลิตสูงสุด
 - 3.4) ทำการจับเวลาทันทีที่เปิดเครื่อง
 - 3.5) เมื่อครบ 2 นาทีแล้วให้ทำการหยุดเครื่องผลิตไอโชน
 - 3.6) เก็บสารละลายตัวอย่างที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากแก้วและเครื่องกำจัดไอโชนที่ได้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณไอโชน
- 2) ทำการทดลองซ้ำที่ อัตราการไหลเข้าของอากาศค่าเดิมอีก 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละอัตราการไหล
 - 3) ทำการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเข้าของอากาศ เป็น 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึง ข้อ 3) ใหม่

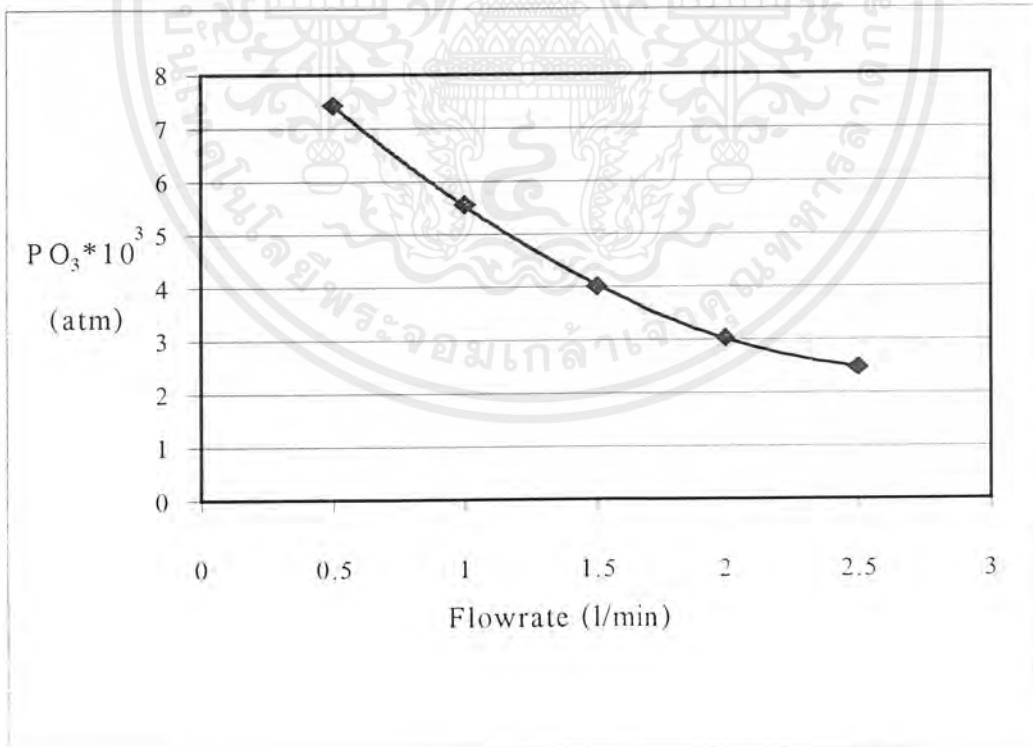
โดยปกติจะรายงานค่าความเข้มข้นของไอโชนในรูปของความดันย่อยของไอโชน โดยที่ ค่าความดันย่อยของไอโชนที่มีความสัมพันธ์ กับความเข้มข้นของไอโชน ซึ่งการคำนวณค่าความดันย่อยของไอโชนแสดงในภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ที่ใช้ในการไตเตรต และปริมาณของไอโชนที่สังเคราะห์ได้

อัตราการไหลของออกซิเจน(ลิตร / นาที)	ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณของไอโชนที่สังเคราะห์ได้ (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)	ค่าความดันของไอโชน (atm)
0.50	4.95	356.40	7.4249×10^{-3}
1.00	6.60	475.20	5.5431×10^{-3}
1.50	7.15	514.80	4.0040×10^{-3}
2.00	7.20	518.40	3.0240×10^{-3}
2.50	7.40	532.80	2.4684×10^{-3}



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจน กับความดันย่อยของ ไอโชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 การออกซิเดชันเหล็ก และนิกเกิลด้วยโอโซน

แบ่งการทดลอง 5 ตอนดังนี้

- 1) การตรวจสอบการเกิดการตกตะกอนร่วมของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ในการตกตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และการตกตะกอนร่วมของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ในการตกตะกอนของ NiOOH
- 2) การทดสอบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก กับความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา
- 3) การทำการทดลองออกซิเดชันเหล็ก และนิกเกิล ที่ค่า pH ต่างๆ
- 4) การทำการทดลองออกซิเดชันสารละลายผสมเหล็ก และนิกเกิล ที่ค่า pH ต่างๆ
- 5) การหาอันดับและค่าคงที่ความเร็วปฏิกิริยา

ตอนที่ 1 การตรวจสอบการเกิดการตกตะกอนร่วมของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ในการตกตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และการตกตะกอนร่วมของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ในการตกตะกอนของ NiOOH

จะทำการศึกษาถึงค่า pH ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในแผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของเหล็ก และนิกเกิล ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงไร และจะได้เป็นแนวทางในการกำหนดค่า pH ที่จะต้องควบคุม ในการทำการทดลองออกซิเดชันเหล็ก และนิกเกิล เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ NiOOH เท่านั้น

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายเหล็ก (II) ซัลเฟต 0.10 กรัมต่อลิตร
2. สารละลายนิกเกิล (II) ซัลเฟต 0.10 กรัมต่อลิตร
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.0000 โมลาร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. pH meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. dropper
3. บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

- 1) นำสารละลายเหล็ก 0.10 กรัม/ลิตร และ สารละลายนิกเกิล 0.10 กรัม/ลิตร มาอย่างละ 20.00 มิลลิลิตร
- 2) ปรับ pH ของสารละลายตัวอย่างในข้อ 1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อาจใช้สารละลายกรด-ซัลฟูริกได้ ถ้าจำเป็น) โดยปรับสารละลายเหล็ก ให้มีค่า pH อยู่ที่ 4, 5 และ 6 ส่วน สารละลายนิกเกิล ให้มีค่า pH อยู่ที่ 7, 8 และ 9
- 3) สังเกตการเกิดตะกอนทันทีที่เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ หลังจากทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

ผลการทดลอง

เหล็ก

เหล็กตกตะกอนที่ pH ต่ำประมาณ 4 โดยที่ตะกอนจะไม่เกิดขึ้นทันทีแต่จะเกิดหลังจากที่ทิ้งไว้ประมาณหนึ่งคืน ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของระบบ เหล็ก-น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.10 กรัม/ลิตร (รูปที่ 2.1) แสดงว่าตะกอนที่เกิดขึ้นเป็น ตะกอนของ Fe(II) อย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นการทดลองออกซิไดซ์เหล็กด้วยโอโซนจะทำได้ในค่า pH ที่เท่ากับหรือต่ำกว่า 4

นิกเกิล

นิกเกิลตกตะกอนที่ pH ประมาณ 8 โดยที่ตะกอนจะเกิดขึ้นหลังจากที่ทิ้งไว้ประมาณหนึ่งคืนเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของระบบ นิกเกิล-น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (รูปที่ 2.2) แสดงว่าตะกอนที่เกิดขึ้นเป็น ตะกอนของ Ni(II) อย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นการทดลองออกซิไดซ์นิกเกิลด้วยโอโซนจะทำได้ในค่า pH ที่เท่ากับหรือต่ำกว่า 8

ตอนที่ 2 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กกับความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา

ในการทดลองการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นจำเป็นต้องควบคุมค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อความเร็วของปฏิกิริยา คือ ความเร็วของการกวน ความเข้มข้นของโอโซน ให้มีค่าคงที่ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรที่สามารถควบคุมให้การ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กเป็นไปตามที่กำหนดไว้ จากนั้นจะนำเอาค่าตัวแปรค่าเดียวกันนี้ไปทดลองใช้ในการออกซิไดซ์เหล็กเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยแบ่งการทดลองในตอนที 2 ออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- การทดลองการออกซิไดซ์เหล็กเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซน
- การทดลองการออกซิไดซ์เหล็กเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการกวนแท่งแม่เหล็ก

ส่วนที่ 1 การทดลองการออกซิไดซ์เหล็กเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซน

เนื่องจากต้องการให้เหล็กตกตะกอนให้หมดภายในเวลาที่กำหนดคือ ประมาณ 10 นาที ซึ่งได้พิจารณาแล้วว่าเป็นเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดลอง ทำให้การเก็บตัวอย่างเป็นไปได้โดยสะดวก ถ้าเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนมีค่าน้อยจนเกินไปจะทำให้การเก็บสารตัวอย่างเป็นไปได้ยาก และถ้าเวลาที่ใช้มีค่านานจนเกินไปอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำการทดลองได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จะใช้ผลการทดลองจากขั้นตอน การทดลองวัดปริมาณ โอโซน มาใช้พิจารณาควบคู่ไปด้วย โดยจะทำการทดลองการออกซิไดซ์เหล็ก ที่ค่าความเข้มข้นของโอโซนต่างๆกัน ที่ค่า pH คงที่เท่ากับ 3 แล้วพิจารณาเลือกค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการทดลองในขั้นต่อไป

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายเหล็ก (II) ซัลเฟต 0.10 กรัมต่อลิตร
2. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1.0000 โมลาร์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1.0000 โมลาร์
4. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เข้มข้น 2 % โดยน้ำหนัก

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดอุปกรณ์การเติมโอโซนและ เครื่องผลิตโอโซน
2. ถังออกซิเจน
3. เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แท่งแม่เหล็ก
5. pH meter
6. นาฬิกาจับเวลา
7. บิวเรต
8. กรวยกรอง
9. กระดาษกรองเบอร์ 1
10. ขวดเก็บสารตัวอย่าง
11. ปิเปตขนาด 5.00 และ 10.00 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

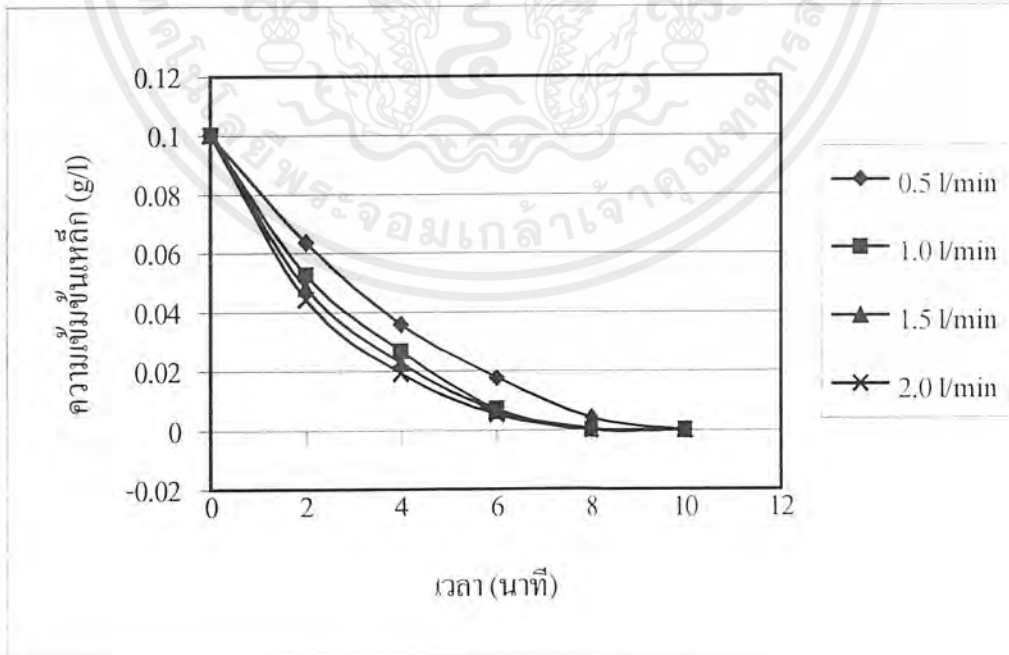
- 1) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดกำจัดไอโชนเพื่อกำจัดไอโชนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา
- 2) เติมสารละลายโลหะ ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตรลงในเครื่องเติมไอโชน
- 3) เปิดเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที
- 4) วัด pH ของสารละลายในอุปกรณ์เติมไอโชนแล้วปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 3 โดยไโคเรตครดไฮโดรคลอริก เมื่อสารละลายโลหะเป็นเบสมากเกินไป หรือไโคเรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายโลหะเป็นกรดมากเกินไป
- 5) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะด้วยปิเปตต์ขนาด 5 มิลลิลิตร ในขวดเก็บตัวอย่างเมื่อสารละลายโลหะมีค่า pH ตามต้องการ (ที่เวลา 0 นาที)
- 6) เปิดวาล์วที่ถังออกซิเจนให้ออกซิเจนไหลเข้าเครื่องผลิตไอโชน และปรับอัตราการไหลที่ 0.5 ลิตร / นาที
- 7) เปิดสวิทช์เพื่อเดินเครื่องผลิตไอโชน พร้อมทั้งจับเวลา
- 8) เก็บตัวอย่างของสารละลายโลหะทุกๆ 2 นาที ด้วยปิเปตต์ ขนาด 5 มิลลิลิตร และปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา
- 9) กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
- 10) นำตัวอย่างของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก
- 11) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจนให้มีค่าเท่ากับ 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.4 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในสารละลาย ตัวอย่างที่เวลาต่างๆเมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลเข้าของออกซิเจน

เวลา (นาที)	อัตราการไหลเข้าของออกซิเจน (ลิตร / นาที)							
	0.5		1.0		1.5		2.0	
	ค่าการดูด กลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	ค่าการดูด กลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	ค่าการดูด กลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	ค่าการดูด กลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)
0	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100
2	1.482	0.0635	1.184	0.0524	1.057	0.0467	1.364	0.0408
4	0.667	0.0300	0.623	0.0206	0.554	0.0179	0.500	0.0127
6	0.416	0.0153	0.182	0.0069	0.167	0.0063	0.140	0.0051
8	0.115	0.0039	0.013	0	0.010	0	0.000	0
10	0.021	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กและเวลาที่อัตราการไหลออกซิเจนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 3.4 สำหรับสารละลายเหล็ก 0.1 กรัม/ลิตร พบว่า ที่อัตราไหลออกซิเจน 0.5 ลิตร/นาที ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเป็นศูนย์ภายในเวลา 10 นาที และที่อัตราไหล 1.0, 1.5 และ 2.0 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเป็นศูนย์ภายในเวลา 8 นาที จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของออกซิเจนจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังนั้น อัตราการไหลของออกซิเจนแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นโอโซน แสดงว่าความเข้มข้นโอโซนเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

ส่วนที่ 2 การทดลองการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กเมื่อเปลี่ยนแปลง อัตราความเร็วการกวนแท่งแม่เหล็ก

การกวนก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาโดยจะทำการทดลองการออกซิไดซ์เหล็กที่อัตราความเร็วในการกวนต่างๆกัน ที่ค่า pH คงที่เท่ากับ 3 และใช้อัตราการไหลของออกซิเจนที่ได้จากการทดลองที่ 2 เพื่อที่จะหาความเร็วในการกวนสูงสุดที่ไม่ทำให้ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งจะใช้ค่าความเร็วในการกวนสูงสุดนี้ในการทดลองขั้นต่อไป

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เหมือนกับการทดลองใน ตอนที่ 2 ส่วนที่ 1

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เหมือนกับการทดลองใน ตอนที่ 2 ส่วนที่ 1

วิธีการทดลอง

- 1) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดก้ำจัดโอโซนเพื่อก้ำจัดโอโซนที่เหลืองจากการทำปฏิกิริยา
- 2) เติมสารละลายโลหะ ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตรลงในเครื่องเดิมโอโซน
- 3) เปิดเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที
- 4) ปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 3 โดยไตเตรตกรดไฮโดรคลอริก เมื่อสารละลายโลหะเป็นเบสมากเกินไป หรือไตเตรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายโลหะเป็นกรดมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

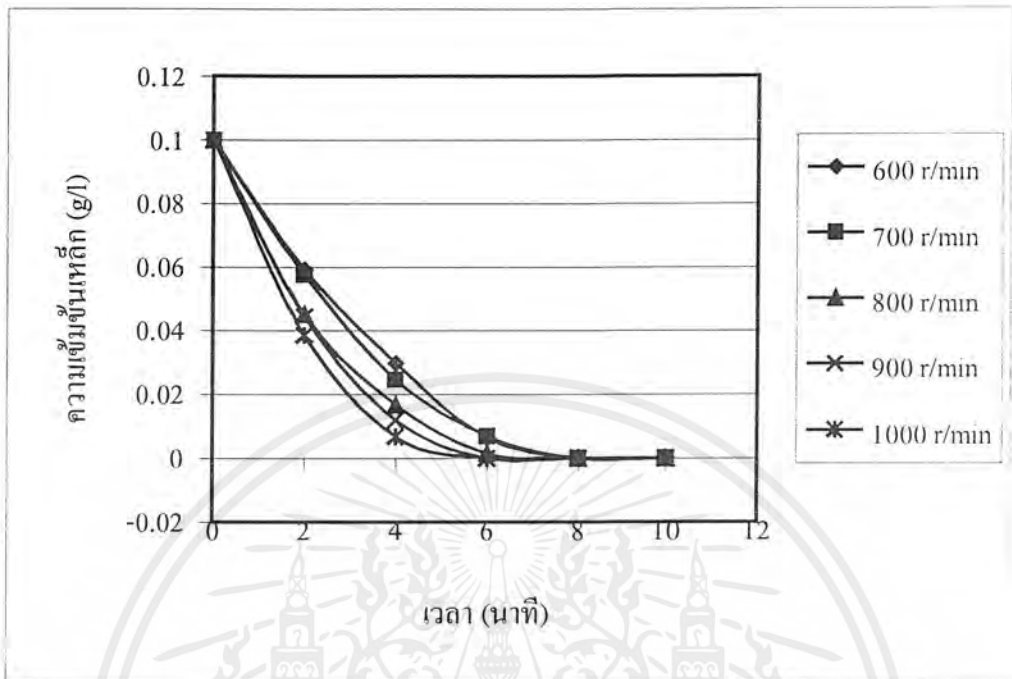
- 5) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะด้วยปิเปตต์ขนาด 5.00 มิลลิลิตร ในขวดเก็บตัวอย่าง เมื่อสารละลายโลหะมีค่า pH ตามต้องการ (ที่เวลา 0 นาที)
- 6) เปิดวาล์วที่ถังออกซิเจนให้ออกซิเจนไหลเข้าเครื่องผลิตโอโซน ปรับอัตราการไหลตามที่กำหนดไว้
- 7) เปิดสวิตช์เพื่อเดินเครื่องผลิตโอโซน พร้อมทั้งจับเวลา
- 8) เก็บตัวอย่างของสารละลายโลหะทุกๆ 2 นาที ด้วยปิเปตต์ ขนาด 5.00 มิลลิลิตร และปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา
- 9) กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
- 10) นำตัวอย่างของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก
- 11) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าความเร็วในการกวน เป็น 700, 800, 900 และ 1000 รอบต่อนาที ตามลำดับ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.5 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในสารละลายตัวอย่างเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการกวน

เวลา (นาที)	ความเร็วในการกวน (รอบ ต่อ นาที)									
	600		700		800		900		1000	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม/ลิตร)
0	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100
2	1.340	0.059	1.259	0.057	1.021	0.045	1.005	0.044	0.875	0.038
4	0.684	0.030	0.570	0.025	0.394	0.017	0.290	0.012	0.174	0.007
6	0.168	0.006	0.179	0.007	0.062	0.001	0.000	0	0.000	0
8	0.006	0	0.001	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กและเวลาที่ความเร็วในการกวนต่างๆ

พิจารณารูปที่ 3.5 สำหรับสารละลายเหล็ก 0.1 กรัม/ลิตร พบว่า ที่ความเร็วในการกวน 600, 700 และ 800 รอบ/นาที ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเป็นศูนย์ภายในเวลา 8 นาที และที่ความเร็วในการกวน 900 และ 1000 รอบ/นาที ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเป็นศูนย์ภายในเวลา 6 นาที จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการกวนจะทำให้ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แสดงว่าความเร็วในการกวนเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

ตอนที่ 3 การทำการทดลองออกซิไดซ์เหล็ก และนิกเกิลที่ ค่า pH ต่างๆกัน

เมื่อนำผลการทดลองในตอนที่ 1 มาพิจารณาควกับแผนภูมิความต่างศักย์ - pH ของเหล็กและนิกเกิล (รูปที่ 2.1, 2.2 และ 2.3) จะช่วยให้สามารถคาดการณ์ค่า pH ที่เหมาะสมในการทำการทดลอง ซึ่งพบว่าค่า pH ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการตกตะกอนเฉพาะ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ นั้นมีค่าอยู่ในช่วง pH 2 – 4 โดยในการทดลองจะทำการทดลอง ที่ค่า pH 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4 ส่วนค่า pH ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการตกตะกอนเฉพาะ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ นั้นมีค่าอยู่ในช่วง ไม่เกิน 7.3 ซึ่งในการทดลอง จะเลือกทำการทดลองที่ค่า pH 6, 7 และเมื่อพิจารณาผลการทดลองจากตอนที่ 2 แล้ว จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สามารถกำหนดสภาวะในการทำการทดลองได้ โดยจะเลือกอัตราการไหลเข้าของออกซิเจนที่ได้จากการทดลองในส่วนที่ 1 ของตอนที่ 2 คือ 1.0 ลิตร/นาที และ จะเลือกความเร็วในการกวนที่ได้จากการทดลองในส่วนที่ 2 ของตอนที่ 2 คือ 800 รอบ/นาที เพื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก กับ นิกเกิล

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายเหล็ก (II) ซัลเฟต 0.10 กรัมต่อลิตร
2. สารละลายนิกเกิล (II) ซัลเฟต 0.10 กรัมต่อลิตร
3. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1.0000 โมลาร์
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1.0000 โมลาร์
5. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เข้มข้น 2 % โดยน้ำหนัก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เหมือนกับการทดลองใน ตอนที่ 2 ส่วนที่ 1

วิธีการทดลอง

- 1) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดก้ำจัดไอโซนเพื่อก้ำจัดไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
- 2) เติมสารละลายโลหะ ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตรลงในเครื่องเติมไอโซน
- 3) เปิดเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที
- 4) ปรับ pH ให้ได้ตามที่กำหนดไว้ โดยไตเตรตกรดไฮโดรคลอริก เมื่อสารละลายโลหะเป็นเบสมากเกินไป หรือไตเตรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายโลหะเป็นกรดมากเกินไป
- 5) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะด้วยปิเปตต์ขนาด 10.00 มิลลิลิตร ในขวดเก็บตัวอย่างเมื่อสารละลายโลหะมีค่า pH ตามต้องการ (ที่เวลา 0 นาที)
- 6) เปิดวาล์วที่ถึงออกซิเจนให้ออกซิเจนไหลเข้าเครื่องผลิตไอโซน ปรับอัตราการไหลที่ 1.0 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) เปิดสวิตช์เพื่อเดินเครื่องผลิตโอโซน พร้อมทั้งจับเวลา
- 8) เก็บตัวอย่างของสารละลายโลหะทุกๆ 2 นาที สำหรับสารละลายเหล็ก และ ทุกๆ 6 นาที สำหรับสารละลายนิกเกิล ด้วยปิเปตต์ ขนาด 10.00 มิลลิลิตร และปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา
- 9) กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
- 10) นำตัวอย่างของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนัก
- 11) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนค่า pH ตามที่ได้ระบุไว้ข้างต้น

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.6 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในสารละลาย ตัวอย่างที่เวลาต่างๆเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH

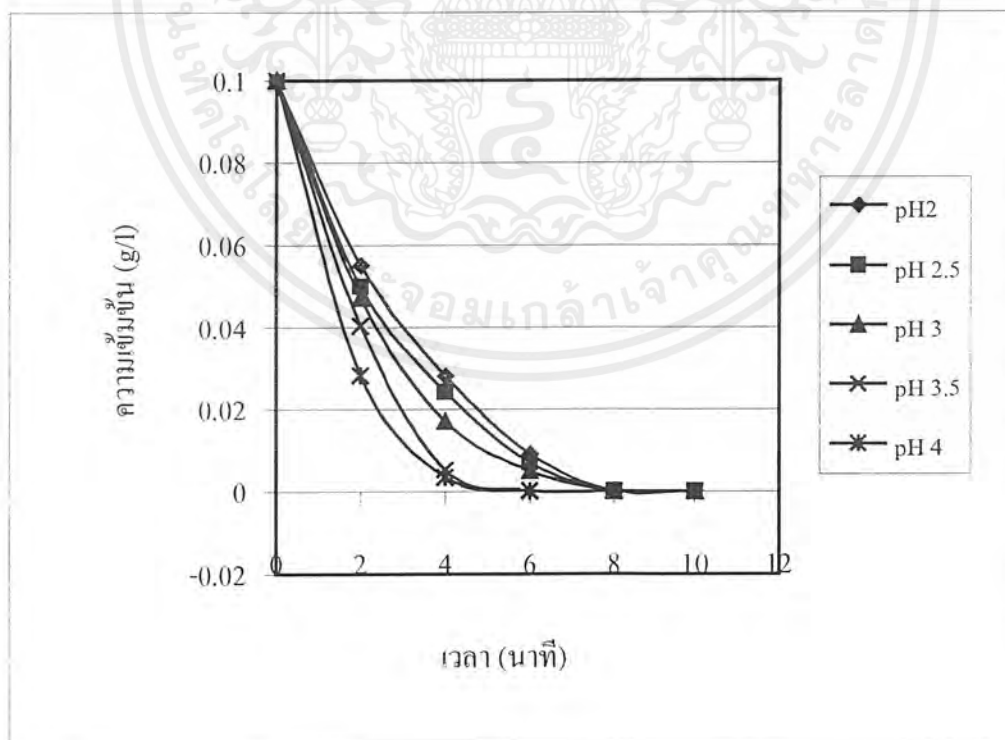
เวลา (นาที)	pH									
	2		2.5		3		3.5		4	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(กรัม / ลิตร)
0	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100	2.232	0.100
2	0.243	0.0551	1.129	0.0499	1.066	0.0471	0.918	0.0404	0.649	0.0282
4	0.647	0.0287	0.562	0.0242	0.402	0.0170	0.144	0.0053	0.104	0.0034
6	0.225	0.0090	0.180	0.0069	0.136	0.0050	0.054	0.0032	0.026	0
8	0.018	0	0.017	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

จากผลการทดลองตารางที่ 3.6 และ 3.7 สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็ก และนิกเกิล กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่า pH ต่างๆดังรูปที่ 3.6-3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ค่าการดูดกลืนแสงของนิกเกิล ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ในสารละลาย ตัวอย่างที่เวลาต่างๆเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH

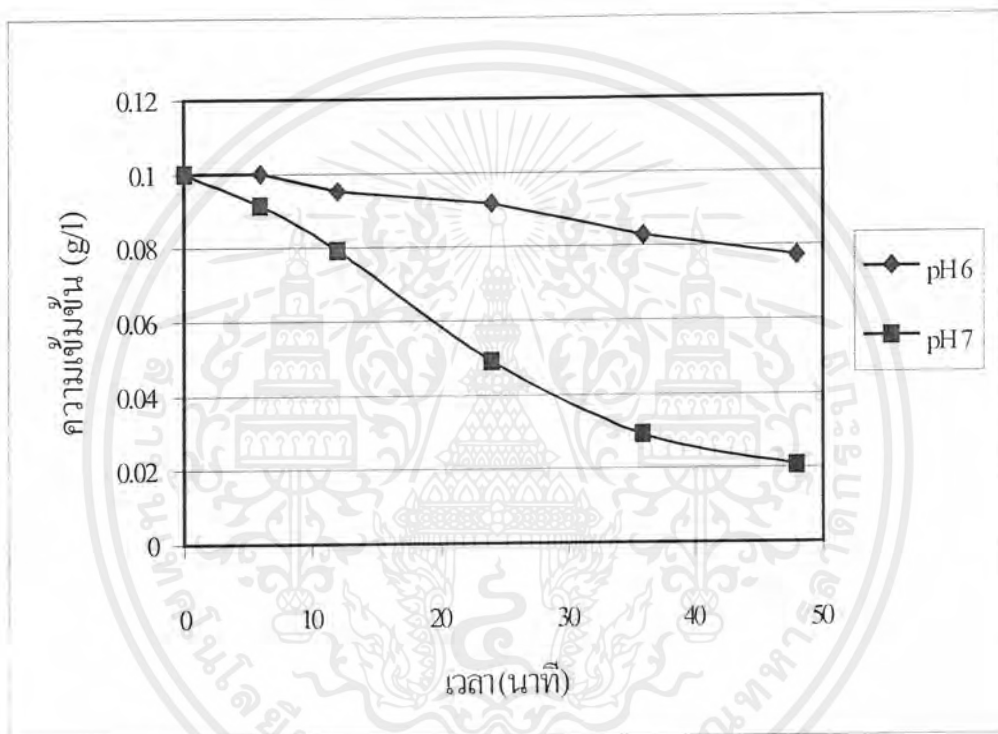
เวลา (นาที)	pH			
	6		7	
	ค่าการดูดกลืน แสง	ความเข้มข้น (กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืน แสง	ความเข้มข้น (กรัม / ลิตร)
0	1.462	0.1	1.462	0.1
6	1.460	0.1	1.429	0.0913
12	1.439	0.0951	1.370	0.0790
24	1.430	0.0916	1.002	0.0498
36	1.392	0.0827	0.856	0.0290
48	1.356	0.0770	0.522	0.0206



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กกับเวลาที่ค่า pH ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 3.6 สำหรับสารละลายเหล็ก 0.1 กรัม/ลิตร ที่ pH 4 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเป็นศูนย์ภายในเวลา 6 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เร็วที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายเหล็กที่ pH อื่นๆ ส่วนที่ pH มากกว่า 4 ไม่ทำการศึกษาเนื่องจาก Fe(II) ถูกออกซิไดซ์ กลายเป็น Fe(III) ตามที่อธิบายไว้ในบททดลองที่ 2 ตอนที่ 1 ดังนั้น pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเหล็กด้วยโอโซน คือ ที่ pH 4



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH ต่างๆ

พิจารณารูปที่ 3.7 สำหรับสารละลายนิกเกิล 0.1 กรัม/ลิตร ที่ pH 7 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กลดลงจาก 0.1 กรัม/ลิตร เป็น 0.0065 กรัม/ลิตร ภายในเวลา 42 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เร็วที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายนิกเกิลที่ pH อื่นๆ

ตอนที่ 4 การทำการทดลองออกซิไดซ์สารละลายผสมเหล็ก และนิกเกิล ที่ค่า pH ต่างๆ

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายผสมเหล็ก (II) ซัลเฟต และ นิกเกิล (II) ซัลเฟต 0.10 กรัมต่อลิตร
2. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1.0000 โมลาร์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1.0000 โมลาร์
4. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เข้มข้น 2 % โดยน้ำหนัก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เหมือนกับการทดลองใน ตอนที่ 2 ส่วนที่ 1

วิธีการทดลอง

- 1) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดก้ำจัดไอโซนเพื่อก้ำจัดไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
- 2) เติมสารละลายโลหะ ความเข้มข้น 0.1 กรัม / ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตรลงในเครื่องเติมไอโซน
- 3) เปิดเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที
- 4) ปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 4 โดยไตเตรตกรดไฮโดรคลอริก เมื่อสารละลายโลหะเป็นเบสมากเกินไป หรือไตเตรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายโลหะเป็นกรดมากเกินไป
- 5) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะประมาณ 20.00 มิลลิลิตร ในขวดเก็บตัวอย่างเมื่อสารละลายโลหะมีค่า pH ตามต้องการ (ที่เวลา 0 นาที)
- 6) เปิดวาล์วที่ถังออกซิเจนให้ออกซิเจนไหลเข้าเครื่องผลิตไอโซน ปรับอัตราการไหลตามที่กำหนดไว้
- 7) เปิดสวิทช์เพื่อเดินเครื่องผลิตไอโซน พร้อมทั้งจับเวลา
- 12) เก็บตัวอย่างของสารละลายโลหะทุกๆ 2 นาที ด้วยปิเปตต์ ขนาด 10.00 มิลลิลิตร และปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา
- 13) กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
- 14) นำตัวอย่างของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15) นำตัวอย่างของสารละลายเริ่มต้น และสุดท้ายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิล

16) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนค่า pH เท่ากับ 3.5, 3 และ 2.7

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.8 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตรและนิกเกิล ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 4

เวลา (นาที)	pH 4			
	การวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก		การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิล	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม / ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม / ลิตร)
0	2.127	0.10	1.462	0.10
2	0.559	0.0241		
4	0.246	0.0102		
6	0.028	0.00		
8	0.000	0.00	1.406	0.086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และนิกเกิลที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตรในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 3.5

เวลา (นาที)	pH 3.5			
	การวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก		การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิล	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม /ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม /ลิตร)
0	2.127	0.10	1.462	0.10
2	1.029	0.0454		
4	0.383	0.0161		
6	0.068	0.0018		
8	0.000	0.00	1.438	0.095

ตารางที่ 3.10 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็กที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และนิกเกิลที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 3

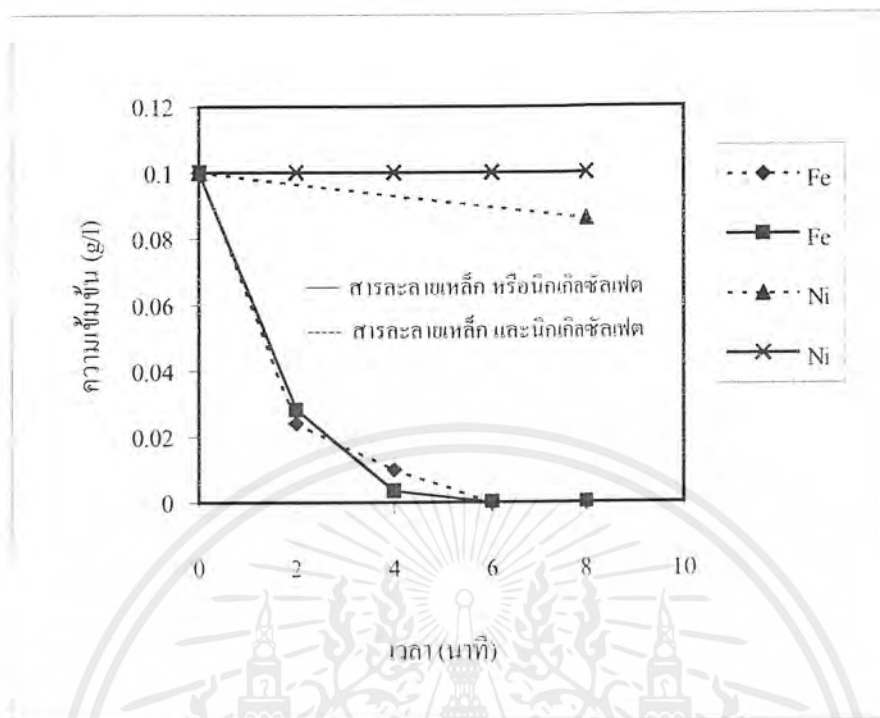
เวลา (นาที)	pH 3			
	การวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก		การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิล	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม /ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม /ลิตร)
0	2.127	0.10	1.462	0.10
2	1.094	0.0483		
4	0.403	0.0170		
6	0.108	0.0036		
8	0.000	0.00	1.459	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

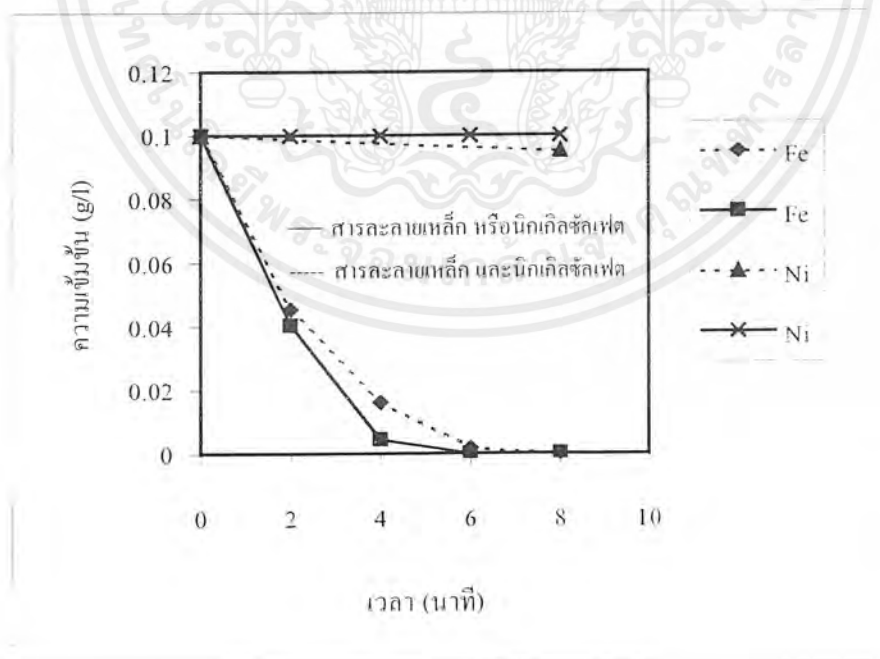
ตารางที่ 3.11 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็ก ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตรและนิกเกิลที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในสารละลายผสมตัวอย่างที่เวลาต่างๆที่ค่า pH 2.7

เวลา (นาที)	pH 2.7			
	การวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก		การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิล	
	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม /ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (กรัม /ลิตร)
0	2.127	0.10	1.462	0.10
2	1.076	0.0475		
4	0.525	0.0225		
6	0.180	0.0069		
8	0.018	0.00		
10	0.000	0.00	1.459	0.10

จากผลการทดลอง ตารางที่ 3.8 – 3.11 สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็ก และนิกเกิล ในสารละลายผสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่า pH ต่างๆ ดังรูปที่ 3.8 - 3.11

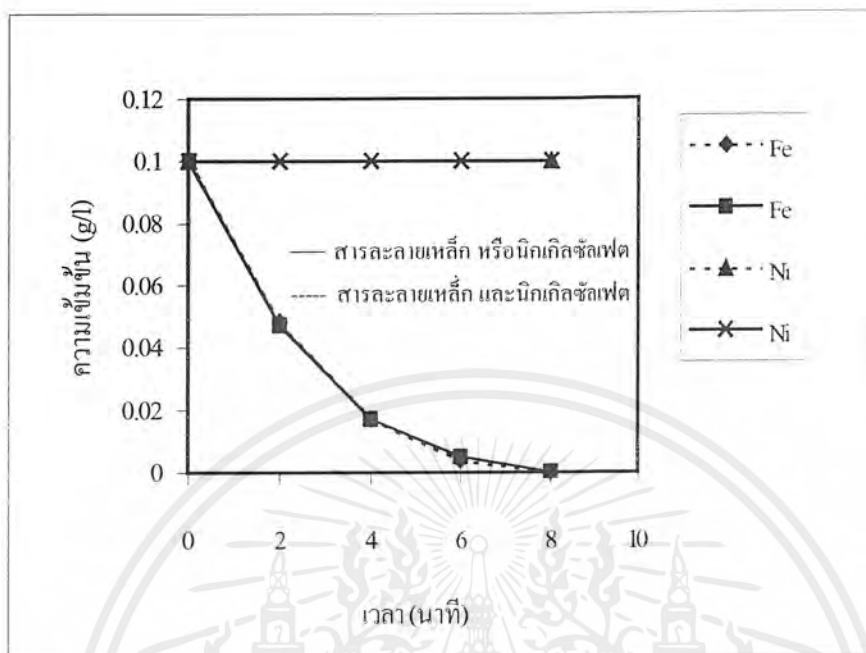


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือนิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH4

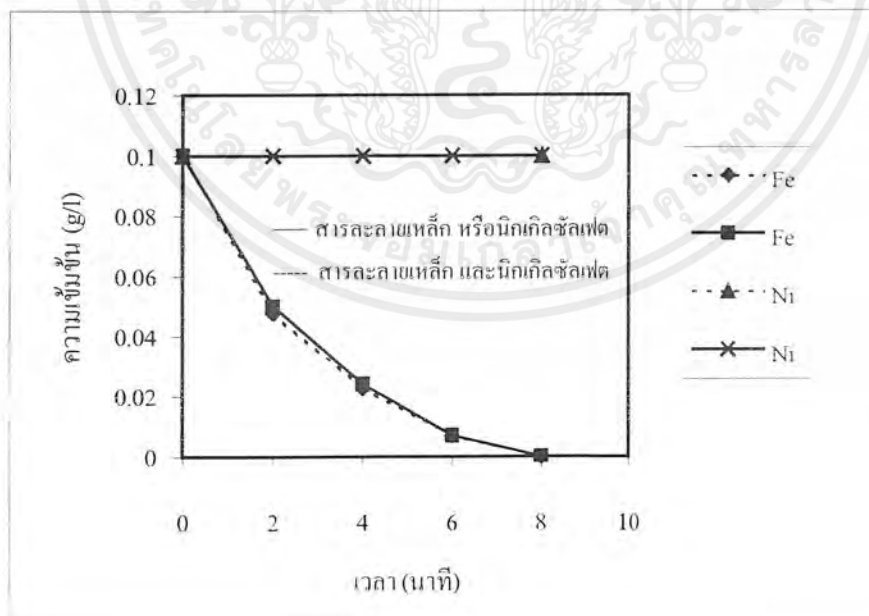


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือนิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือนิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH3



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก และ/หรือนิกเกิลกับเวลาที่ค่า pH2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 3.8 – 3.11 จะเห็นว่าเมื่อมีการผสมสารละลายซัลเฟตของเหล็กและนิกเกิล นิกเกิลสามารถตกตะกอนได้เล็กน้อยที่ค่า pH ต่ำ

ตอนที่ 5 การหาอันดับและค่าคงที่ความเร็วปฏิกิริยา

จากจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยโอโซน จะได้ว่า

$$-\frac{d[M(II)]}{dt} = k_0 [M(II)]^l [O_3]^m [H^+]^n \quad (3.4)$$

เมื่อ $[M(II)]$ = ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่อยู่ในรูป 2+, โมล/ลิตร
 t = เวลา, นาที
 $[O_3]$ = ความเข้มข้นของโอโซน, โมล/ลิตร
 $[H^+]$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน, โมล/ลิตร
 k_0 = ค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยา, โมล⁽ⁿ⁻¹⁾.ลิตร⁽ⁿ⁻¹⁾.นาที⁻¹
 l, m และ n = อันดับของปฏิกิริยา

เพื่อให้ผลการคำนวณค่าอันดับของปฏิกิริยามีความถูกต้อง จึงพิจารณาเฉพาะช่วงต้นของกราฟ คือที่เวลา 0 ถึง 4 นาที สำหรับเหล็ก และที่เวลา 12 ถึง 36 นาที สำหรับนิกเกิล ดังนั้นจากรูปที่ 3.6 และ 3.7 พบว่าที่ค่า pH หนึ่งๆ $[M(II)]$ มีความสัมพันธ์กับเวลาในลักษณะเชิงเส้น แสดงว่าความเร็วของปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย (ค่า $l = 0$) เนื่องจากในโครงการนี้ได้ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการออกซิไดซ์โลหะด้วยโอโซน จึงใช้ความเข้มข้นของโอโซนคงที่ตลอดการทดลอง จากสมการที่ (3.4) จะได้

$$-\frac{d[M(II)]}{dt} = v = k[H^+]^n \quad (3.5)$$

เมื่อ v = ความเร็วของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย, โมล/ลิตร-นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = k_0[\text{O}_3]^m$$

= ค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยา, โมล⁽ⁿ⁻¹⁾.ลิตร⁽ⁿ⁻¹⁾.นาที⁻¹

ใส่ลอการิทึมฐานสิบในสมการที่ (3.5) จะได้

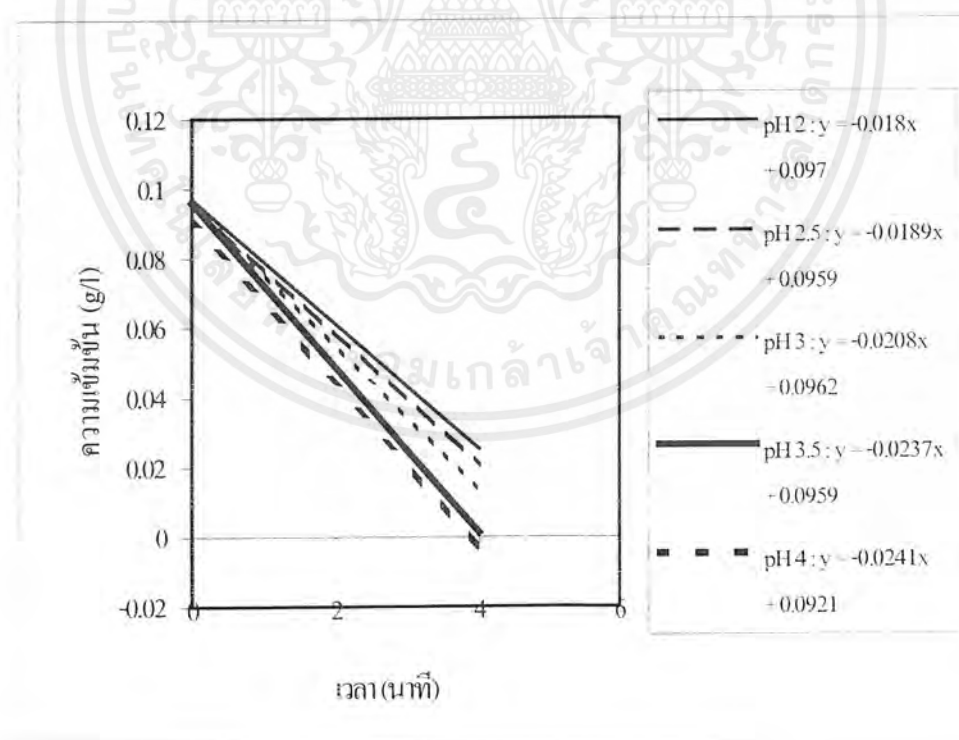
$$\log V = \log k + n \log [\text{H}^+] \quad (3.6)$$

จาก $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ สมการที่ (3.6) จะกลายเป็น

$$\log V = \log k - n \text{pH} \quad (3.7)$$

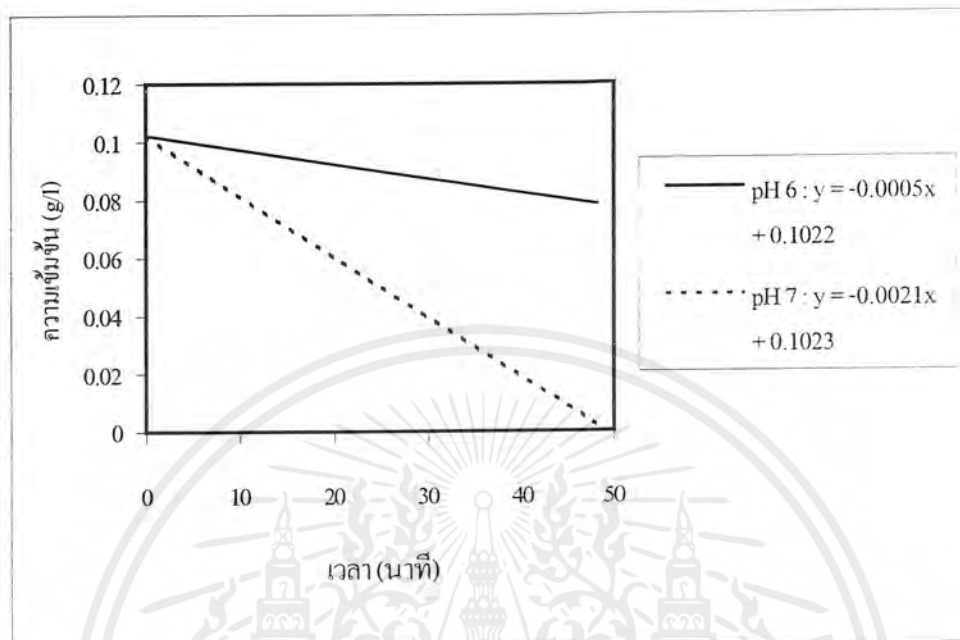
สามารถหาอันดับและค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยาได้จากสร้างกราฟระหว่าง $\log V$ กับ pH โดยมีความชันเท่ากับ $-n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log k$

ค่า V สามารถหาได้จากความชันของกราฟ ระหว่างความเข้มข้นของโลหะในสารละลายกับเวลาที่ pH ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับเหล็ก และรูปที่ 3.13 สำหรับนิกเกิล



รูปที่ 3.12 เส้นแนวโน้มระหว่างความเข้มข้นของเหล็กกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 เส้นแนวโน้มระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลกับเวลา

จากรูปที่ 3.12 และ 3.13 สามารถหาค่า $\log V$ ของเหล็ก และนิกเกิลที่ pH ต่างๆ ได้ดังแสดงใน ตารางที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.12 ค่า $\log V$ ที่ pH 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4 สำหรับเหล็ก

pH	ความชัน (V) จากรูปที่ 3.12 (กรัม/ลิตร-นาทีก)	ความชัน (V) (โมล/ลิตร-นาทีก)	$-\log V$
2	0.0180	3.22×10^{-4}	3.492
2.5	0.0189	3.38×10^{-4}	3.471
3	0.0208	3.72×10^{-4}	3.429
3.5	0.0237	4.24×10^{-4}	3.372
4	0.0241	4.31×10^{-4}	3.365

หมายเหตุ มวลโมเลกุลของเหล็ก มีค่าเท่ากับ = 55.847 กรัม/กรัม โมล

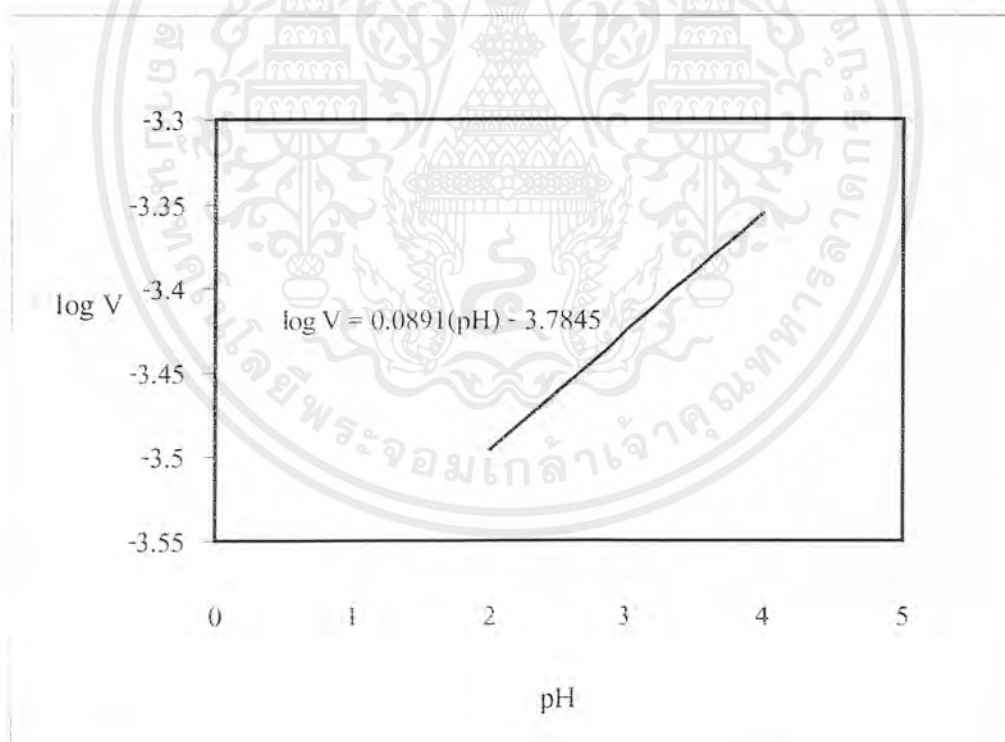
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.13 ค่า $\log V$ ที่ pH 6 และ 7 สำหรับนิกเกิล

pH	ความเข้มข้น (V) จากรูปที่ 3.13 (กรัม/ลิตร-นาที)	ความเข้มข้น (V) (โมล/ลิตร-นาที)	$-\log V$
6	0.0005	8.975×10^{-6}	5.047
7	0.0021	3.769×10^{-5}	4.423

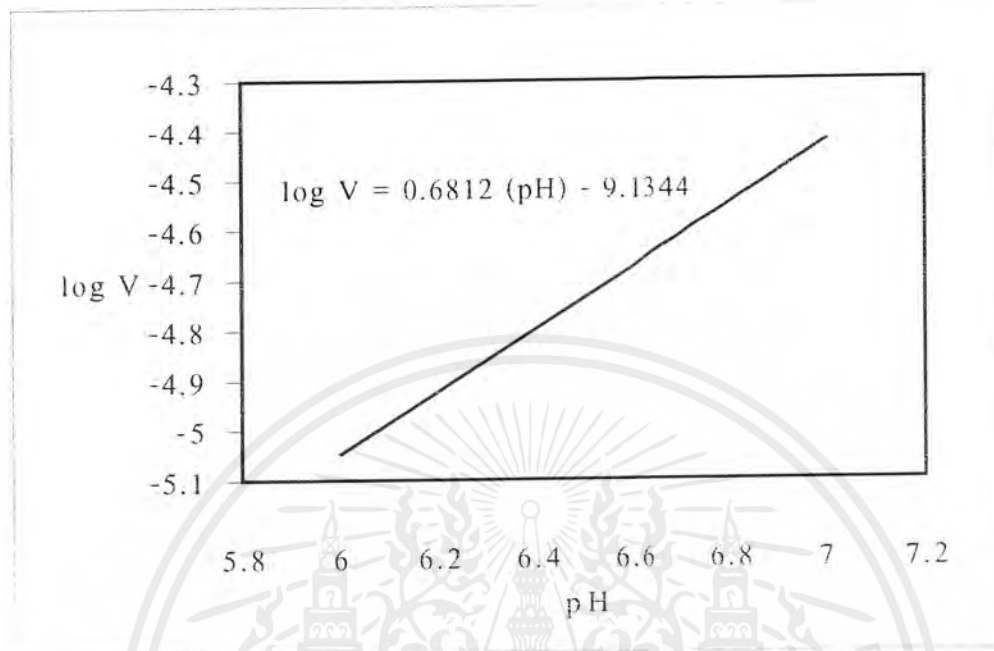
หมายเหตุ มวลโมเลกุลของนิกเกิล มีค่าเท่ากับ = 55.71 กรัม/กรัม โมล

จากตารางที่ 3.12 และ 3.13 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log V$ กับ pH สำหรับเหล็กและนิกเกิล ได้ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log V$ กับ pH ของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log V$ กับ pH ของนิกเกิล

จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 จะสามารถหาอันดับและค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยาได้ โดยอันดับของปฏิกิริยา = - ความชัน และค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยา = $10^{\text{ตัดแกน}}$ ดังแสดงในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ค่าอันดับและค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยาสำหรับเหล็กและนิกเกิล

โลหะ	อันดับของปฏิกิริยา	ค่าคงที่ความเร็วของปฏิกิริยา
เหล็ก	-0.0891	1.64×10^{-4}
นิกเกิล	-0.6812	7.34×10^{-10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุป และวิจารณ์การทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1) ความเข้มข้นของไอโชน และความเร็วในการปั่นกววน มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะด้วยไอโชน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

2) ปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะเหล็กด้วยไอโชนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH 4 และสามารถลดปริมาณของสารละลายเหล็กให้ลดลงจากความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร จนหมด ในเวลา 6 นาที

ดังนั้นในสภาวะการทดลองนี้ค่า pH 4 จึงเป็นค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อกำจัดเหล็กออกจากสารละลายด้วยไอโชน และสามารถคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้เท่ากับ -0.0891 และ 1.64×10^{-4} โมล^{1.089} .ลิตร^{1.089} .นาที⁻¹ ตามลำดับสรุปสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาของสารละลายเหล็กจะเป็นดังสมการที่ (4.1)

$$-\frac{d[Fe(II)]}{dt} = 1.64 \times 10^{-4} [Fe(II)]^0 [H^+]^{1.089} \quad (4.1)$$

3) ปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะนิกเกิลด้วยไอโชนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH 7 และสามารถลดปริมาณของสารละลายนิกเกิลให้ลดลงจากความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร เป็น 0.0065 กรัม/ลิตร ภายในเวลา 42 นาที

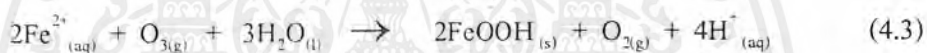
ดังนั้นในสภาวะการทดลองนี้ค่า pH 7 จึงเป็นค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อกำจัดนิกเกิลออกจากสารละลายด้วยไอโชน และสามารถคำนวณหาค่าอันดับและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้เท่ากับ -0.6812 และ 7.34×10^{-10} โมล^{1.089} .ลิตร^{1.089} .นาที⁻¹ ตามลำดับสรุปสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาของสารละลายนิกเกิลจะเป็นดังสมการที่ (4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{d[\text{Ni(II)}]}{dt} = 7.34 \times 10^{-10} [\text{Ni(II)}]^0 [\text{H}^+]^{-0.6812} \quad (4.2)$$

4) จากค่า pH ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักและนิกเกิล คือ ที่ pH 4 และ ที่ pH 7 สามารถนำมาใช้แยกชนิดของสารละลายโลหะผสมเหล็ก และนิกเกิลได้ โดยการเติมโอโซนในสารละลายโลหะผสมดังกล่าวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งในขั้นแรกต้องควบคุม pH ให้มีค่าเท่ากับ 3-4 เพื่อแยกเหล็กให้ตกตะกอนออกมาก่อน จากนั้นแยกนิกเกิลออกที่ pH เท่ากับ 7 ซึ่งนิกเกิลจะตกตะกอนตามมา

5) จากการตรวจตะกอนด้วยเครื่อง x-ray diffraction ตะกอนของเหล็กที่เกิดขึ้น อยู่ในรูปของ FeOOH ส่วนตะกอนของนิกเกิลอยู่ในรูป NiOOH [11] โดยสามารถแสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4)



วิจารณ์การทดลอง

1. ในการทดลอง การควบคุมค่า pH ให้คงที่นั้นเป็นไปได้ยาก จึงอาจส่งผลทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้
2. ในการไตเตรตสารละลายต้องระวังมาก โดยเฉพาะขณะเข้าใกล้จุดยุติ เนื่องจากใช้สารเพียงเล็กน้อยก็เปลี่ยนสีแล้ว
3. ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ ต้องเตรียมสารให้มีปริมาตรพอดี ถ้ามีปริมาณมากหรือน้อยเกินไป จะมีผลต่อการอ่านค่าการดูดกลืนแสง
4. จากการทดลอง ตะกอนของเหล็ก และนิกเกิล อยู่ในรูป FeOOH และ NiOOH ตามลำดับซึ่งผลของตะกอนเหล็กไม่ตรงตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ข้างต้น อาจมีผลมาจากเงื่อนไขในการทำการทดลอง เช่นเวลาที่ทำการตกตะกอน เนื่องจาก เวลาตกตะกอนสั้น ถ้าใช้เวลานานกว่านี้อาจทำให้เกิดตะกอนอีกรูปแบบหนึ่ง หรือ ในกรณีเกิดปฏิกิริยาที่มีบรรยากาศต่างกัน ก็ทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Glofford, D., Subramonian, S., Thomas J.S. **Environmental Science Technology**, 20, 1986, pp 1072 –1080.
- [2] Vogel, **Textbook of Quantitative Chemical Analysis**, 5th ed., 1989, pp 690 – 692.
- [3] Vogel, **Textbook of Quantitative Chemical Analysis**, 5th ed., 1989, pp 181 – 182.
- [4] ณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์ ธนชูชัย บุญนะที่ การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้โอโซน
วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมษายน – พฤษภาคม 2542
- [5] M. Pourbaix, **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**, Pergamon, New York, 1966.
- [6] **Uhlig's Corrosion Handbook**, 2nd ed., Wiley – Interscience Publication, 2000.
- [7] Rieger, P.H., **Electrochemistry**, Prentice Hall, 1987.
- [8] Rip G. Rice, Aharan NetZer, **Handbook of Ozone Technology and Applications**. Vol.II, 1984, p 23.
- [9] **Metallurgical Processing of Non-ferrous Metals**, Metallurgical Association of Japan (Nihon Kinzoku Gakkai), 1979, p 60.
- [10] Vogel, **Textbook of Quantitative Chemical Analysis**, 5th ed., 1989, pp 391 – 392.
- [11] T. Nishimura, Y. Umetsu, **Separation of cobalt and nickel by ozone oxidation**, 30, 1992, pp 438 – 497.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Reaction	E°, 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 ₄)	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
$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	0.7991
$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	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
$Co(dip)_3^{3+} + e^- \rightarrow Co(dip)_3^{2+}$	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
$Ag_2(S_2O_3)_2^{3-} + e^- \rightarrow Ag + 2S_2O_3^{2-}$	0.017
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0.0000
$Ge^{4+} + 2e^- \rightarrow Ge^{2+}$	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
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0.7626
$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2.713
$Li^+ + e^- \rightarrow Li$	-3.040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 พลังงานอิสระกิบส์ที่สภาวะมาตรฐาน (ΔG°) ของสารบางชนิด

Species	ΔG° (kJ / mol)
Fe (Metal)	0
Fe ²⁺ (aq)	-78.87
Fe(OH) ₂ (precip.)	-522.03 *
Fe ³⁺ (aq)	-4.60
Fe(OH) ₃ (precip.)	-699
H ₂ (g)	0
H ⁺ (aq)	0
H ₂ O (l)	-273.18
Ni (Metal)	0
Ni ²⁺ (aq)	-45.6
Ni(OH) ₂ (precip.)	-451.21 *
O ₂ (g)	0
O ₃ (g)	163.2

* ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาคผนวก ง

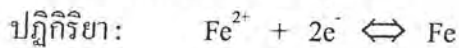
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับ pH

พิจารณาระบบเหล็ก - น้ำ

1) กรณีที่มีอิเล็กตรอนปรากฏในปฏิกิริยา



จากสมการของเนินสต์ (2.12)

$$E = E^0 - \frac{0.0591}{n} \log K_{eq}$$

(2.12)

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

จากปฏิกิริยาจำนวนอิเล็กตรอน (n) เท่ากับ 2

จากสมการ (2.6) จะได้ว่า

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

และจากหัวข้อที่ 2.1 ค่าแอกทิวิตีของเหล็กบริสุทธิ์จะเท่ากับ 1

เพราะฉะนั้น

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

แทนค่าต่างๆลงในสมการ (2.12)

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

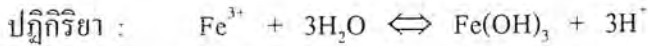
$$E = -0.44 + 0.0259 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$$

เป็นดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กรณีไม่มีอิเล็กตรอนปรากฏในปฏิกิริยา

กรณีนี้ไม่สามารถใช้สมการของเนิสต์คำนวณได้ เพราะค่า n จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงต้องคำนวณโดยใช้ค่าพลังงานอิสระของกิบส์



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

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

จากตาราง ก.2 สามารถหาค่า ΔG^0 ของสารต่างๆ ได้ดังนี้

$$\Delta G^0_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = -699 \text{ กิโลจูลต่อโมล}$$

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

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

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

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\Delta G^0 = -699 + 3(0) - (-4.6) - 3(-237.18) \text{ กิโลจูลต่อโมล}$$

$$= 19.534 \text{ กิโลจูลต่อโมล}$$

$$= 19.534 \text{ จูลต่อโมล}$$

จากสมการ (2.5)

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{eq} \quad (2.5)$$

แทนค่า จะได้

$$19.534 = - (8.314) (25+273) (2.3) \log \left[\frac{(a_{\text{H}^+})^3}{a_{\text{Fe}^{3+}}} \right]$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\text{pH} = 1.1426$$

เป็นดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำหรับระบบอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าความดันย่อยของโอโซน

ตัวอย่างการคำนวณจากตารางผลการทดลองที่ 4.1 อัตราการไหลของออกซิเจน เท่ากับ 1.00 ลิตร / นาที ความเข้มข้นของโอโซน เท่ากับ 475.20 มิลลิกรัม / ชั่วโมง

จากสูตรการคำนวณความดัน

$$P_{O_3} = x_{O_3} P \quad (\text{ก.1})$$

$$P_{O_3} = \text{ค่าความดันย่อยของโอโซน (atm)}$$

$$x_{O_3} = \text{mole fraction ของโอโซน}$$

$$P = \text{total pressure (atm)} = 1 \text{ atm}$$

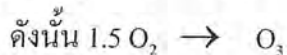
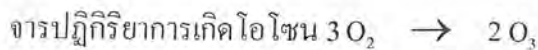
$$\text{โดยที่ } x_{O_3} = \frac{\text{mol}_{O_3}}{\text{mol}_{\text{total}}} = \frac{\text{mol}_{O_3}}{\text{mol}_{O_3} + \text{mol}_{O_2}} \quad (\text{ก.2})$$

$$\text{mol}_{O_3} : 0.4752 \text{ g/h. } O_3 = 9.900 \times 10^{-3} \text{ mol/h. } O_3$$

$$\text{mol}_{O_2} \text{ entry : } 1.00 \text{ l/min } O_2 = 60.00 \text{ l/h. } O_2$$

$$V_{\text{ideal gas}} = 22.4 \text{ l/mol}$$

$$\therefore \text{mol}_{O_2} \text{ entry} = \frac{1}{22.4} \times 60.0 = 2.679 \text{ mol/h. } O_2$$



$$O_3 \quad 9.900 \times 10^{-3} \text{ mol/h. } O_3 = 1.5 \times 9.900 \times 10^{-3} \text{ mol/h. } O_2$$

$$= 1.485 \times 10^{-2} \text{ mol/h. } O_2$$

$$O_2 \text{ in mixture} = 2.679 - (1.485 \times 10^{-2}) = 2.664 \text{ mol/h. } O_2$$

$$\text{Total moles} = (1.485 \times 10^{-2}) + 2.664 = 2.679 \text{ mol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_{O_3} = \frac{1.485 \times 10^{-2}}{2.679} = 5.54 \times 10^{-3}$$

$$P_{O_3} = 5.54 \times 10^{-3} \text{ atm}$$

ความดันย่อยของโอโซนที่อัตราการไหลออกซิเจน 1 ลิตร / นาที เท่ากับ 5.54×10^{-3} atm
ที่อัตราการไหลออกซิเจนอื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การทดลองหาค่า ΔG° ของเหล็กและนิกเกิล

เนื่องจากผลการทดลองการตกตะกอนของเหล็ก ไม่เป็นไปตามแนวโน้มของแผนภูมิความต่างศักย์-pH ของระบบเหล็ก-น้ำที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม ต่อ ลิตร ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองเพื่อคำนวณหาค่า ซึ่งนำไปใช้คำนวณหาค่า pH ที่ทำให้เหล็กเกิดการตกตะกอน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองรวมไปถึงนิกเกิลด้วย

วิธีการทดลอง

- 1) เตรียมสารละลายเหล็ก และนิกเกิล ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร
- 2) บีบอัดเหล็ก และนิกเกิล 50 มิลลิลิตร ลงใน flask อย่างละ 3 ขวด โดย ในกรณีของเหล็กปรับ pH ให้ได้ 4, 5 และ 6
ในกรณีของนิกเกิลปรับ pH ให้ได้ 8, 8.5 และ 9
- 3) นำไปเข้าเครื่องเย่า ทั้งไว้ 1 คืน
- 4) นำมาตรวจหาค่า pH แล้ววัดความเข้มข้นของเหล็ก และนิกเกิลที่เหลือในแต่ละขวด
- 5) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่า ΔG° ดังแสดงในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.1 ผลการทดลองการหาค่า ΔG° ของเหล็ก

ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH ลงท้าย	ความเข้มข้น ของ Fe^{2+} ที่เหลือ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้น ของ Fe^{2+} ที่ เหลือ (โมล/ลิตร) ($\times 10^{-3}$)	ค่า K ($\times 10^{-6}$)	log K
4.021	4.038	0.1	1.79	4.69	-5.3288
5.035	4.131	0.09	1.61	3.4	-5.4685
6.010	4.007	0.06	1.07	9.05	-5.1433
					เฉลี่ย = -5.3135

ตาราง ง.2 ผลการทดลองการหาค่า ΔG° ของนิกเกิล

ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH ลงท้าย	ความเข้มข้น ของ Ni^{2+} ที่เหลือ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้น ของ Ni^{2+} ที่ เหลือ (โมล/ลิตร) ($\times 10^{-3}$)	ค่า K ($\times 10^{-12}$)	log K
8.023	7.333	0.076	1.29	1.67	-11.7772
8.497	7.530	0.034	0.579	1.5	-11.8239
9.019	7.912	0.008	0.136	1.11	-11.9546
					เฉลี่ย = -11.8519

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราได้ค่า K เหลือจากการทดลองแล้ว นำมาหาค่า ΔG^0 ของปฏิกิริยา ได้ดังต่อไปนี้

กรณีของเหล็ก

จากสมการ
$$\Delta G^0 = -2.303RT \log K$$

โดยที่ $R = 8.314$ จูล / โมล - เคลวิน

$T = 32$ องศาเซลเซียส = 305 เคลวิน

$\log K = -5.3135$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \Delta G^0 &= -2.303 (8.314) (305) (-5.3135) \\ &= 31030.19 \text{ จูล / โมล} \end{aligned}$$

กรณีของนิกเกิล

$T = 30$ องศาเซลเซียส = 303 เคลวิน

$\log K = -11.8519$

$$\begin{aligned} \Delta G^0 &= -2.303 (8.314) (303) (-11.8519) \\ &= 68748.77 \text{ จูล ต่อ โมล} \end{aligned}$$

จากปฏิกิริยา
$$\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_2 + 2\text{H}^+$$

ค่า ΔG^0 ของปฏิกิริยา มีค่าดังนี้

$$\Delta G^0 = \Delta G^0_{\text{Fe(OH)}_2} + 2\Delta G^0_{\text{H}^+} - \Delta G^0_{\text{Fe}^{2+}} - 2\Delta G^0_{\text{H}_2\text{O}}$$

แทนค่าจะได้

$$-31.03 = \Delta G^0_{\text{Fe(OH)}_2} + (2 \times 0) - (-78.87) - (2 \times (-237.18))$$

$$\Delta G^0_{\text{Fe(OH)}_2} = 522.03 \text{ กิโลจูล / โมล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถนำค่า $\Delta G^0_{\text{Fe(OH)}_2}$ ที่ได้นี้มาคำนวณ พบว่าค่า pH ที่ทำให้เหล็กตกตะกอนในรูป Fe(OH)_2 จะเป็นดังสมการ

$$\text{pH} = 2.6567 - 0.5 \log a_{\text{Fe}^{2+}}$$

เมื่อแทนค่า $a_{\text{Fe}^{2+}} = 1.79 \times 10^{-3}$ โมล / ลิตร ลงไปจะได้ $\text{pH} = 4.030$

จากปฏิกิริยา $\text{Ni}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ni(OH)}_2 + 2\text{H}^+$

ค่า ΔG^0 ของปฏิกิริยา มีค่าดังนี้

$$\Delta G^0 = \Delta G^0_{\text{Ni(OH)}_2} + 2\Delta G^0_{\text{H}^+} - \Delta G^0_{\text{Ni}^{2+}} - 2\Delta G^0_{\text{H}_2\text{O}}$$

แทนค่าจะได้

$$-68.75 = \Delta G^0_{\text{Ni(OH)}_2} + (2 \times 0) - (-45.6) - (2 \times (-237.18))$$

$$\Delta G^0_{\text{Ni(OH)}_2} = -451.21 \text{ กิโลจูล / โมล}$$

เราสามารถนำค่า $\Delta G^0_{\text{Ni(OH)}_2}$ ที่ได้นี้มาคำนวณ พบว่าค่า pH ที่ทำให้เหล็กตกตะกอนในรูป Ni(OH)_2 จะเป็นดังสมการ

$$\text{pH} = 5.9259 - 0.5 \log a_{\text{Ni}^{2+}}$$

เมื่อแทนค่า $a_{\text{Ni}^{2+}} = 1.29 \times 10^{-3}$ โมล / ลิตร ลงไปจะได้ $\text{pH} = 7.309$

การทดลองหาความเข้มข้นที่แท้จริงของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ [10]

การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เข้มข้น 0.1000 M
2. สารละลายมาตรฐานปฐุมภูมิโพแทสเซียมไอโอเดต เตรียมโดย ชั่ง KIO_3 4.28 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เติมคลอโรฟอร์ม ประมาณ 3 หยด
3. สารละลายน้ำแข็ง เตรียมโดยละลายแข็ง 0.10 กรัมในน้ำกลั่นเล็กน้อย ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน ต้มให้เดือดนาน 1 นาที ทิ้งให้เย็น แล้วเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2-3 กรัม กวนให้ละลาย

วิธีการทดลอง

1. ปิเปตต์สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต มา 25.00 มิลลิลิตร ใส่ขวดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.00 กรัม และ กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นประมาณ 1 M 5.00 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตทันที จนได้สารละลายที่มีสีชาอ่อน
4. เติมน้ำแข็ง 2.00 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไตเตรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป บันทึกปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้
5. ทำซ้ำอีกครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นของ โซเดียมไทโอซัลเฟตที่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

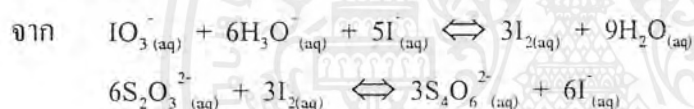
ผลการทดลอง

น้ำหนักของ $\text{KIO}_3 = 4.28$ กรัม

ตาราง จ.1 ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรต

ครั้งที่	ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)
1	29.18
2	29.25
เฉลี่ย	29.215

การคำนวณ



จะเห็นว่า KIO_3 1 โมล จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 6 โมล

มวลโมลของ $\text{KIO}_3 = 214$ g/mol

\therefore ปริมาณเนื้อสาร $\text{KIO}_3 = 4.28/214 = 2.00 \times 10^{-2}$ โมล

ดังนั้น ในสารละลาย KIO_3 1000.00 ml มีเนื้อสาร KIO_3 อยู่ 2.00×10^{-2} โมล

ในสารละลาย KIO_3 25.00 ml มีเนื้อสาร KIO_3 อยู่ $\frac{25 \times 2.00 \times 10^{-2}}{1000} = 5.00 \times 10^{-4}$ โมล

แสดงว่า ใช้ $\text{S}_2\text{O}_3^{2-} = 6 \times 5.00 \times 10^{-4}$ โมล = 3.00×10^{-3} โมล

จากตาราง จ.2 ปริมาตรเฉลี่ยของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 29.215$ ml

สารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ml มีเนื้อสารอยู่ 3.00×10^{-3} โมล

สารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 1000 ml มีเนื้อสารอยู่ $\frac{3.00 \times 10^{-3} \times 1000}{29.215} = 0.1026$ โมล

\therefore ความเข้มข้นของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 0.1026$ M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้