

ผลของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและโคบอลต์ที่ใส่ต่อการกำจัดนิกเกิลออกจาก
น้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า



นางสาวอภิรดี บัวดก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Initial Concentration of Nickel and Dimethylglyoxime on the Nickel Removal
from Chemical Laboratory's Wastewater by Electrochemical Method

Miss Apirugee Boudok



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและโคบอลต์ที่กล ออกซีมีที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสีย ห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า |
| โดย | นางสาวอภิรุจี บัวดก |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร.เจริญขวัญ ไกรยา |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.เจริญขวัญ ไกรยา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัณณิกะ)

อภิรุจี บัวตง : ผลของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลและไดเมทิลไกลออกซิมที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (Effects of Initial Concentration of Nickel and Dimethylglyoxime on the Nickel Removal Chemical Laboratory's Wastewater by Electrochemical Method) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เจริญขวัญ ไกรยา, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลาย ถึงปฏิกรณ์ถูกแบ่งเป็นฝั่งแคโทดและฝั่งแอโนด ฝั่งแคโทดบรรจุน้ำเสียและฝั่งแอโนดบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม โดยสารละลายทั้งสองถูกกั้นออกจากกันด้วยผนังหรือแผ่นแก้วพอร์ซเลน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ารูปแบบรอยต่อของสารละลายและชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดมีผลต่อขีดจำกัดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้และเวลาในการกำจัดนิกเกิล โดยเวลาที่ใช้สำหรับกำจัดนิกเกิลขึ้นอยู่กับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย ความเข้มข้นนิกเกิลและไดเมทิลไกลออกซิม งานวิจัยนี้แสดงผลการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียที่มีปริมาณนิกเกิลไอออน 750 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสามารถกำจัดนิกเกิลได้ภายใน 14 นาที หลังการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเป็น 1.2 และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด และกั้นสารละลายด้วยผนังพอร์ซเลน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570449521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: NICKEL / WASTERWATER / REDUCTION / ELECTROLYSIS / PRECIPITATION

APIRUGEE BOUDOK: Effects of Initial Concentration of Nickel and Dimethylglyoxime on the Nickel Removal Chemical Laboratory's Wastewater by Electrochemical Method. ADVISOR: ASSOC. PROF. KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR: CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 113 pp.

This study presents a constant-current electrolysis technique to remove Ni(II) from wastewater using a two-compartment electrochemical reactor. The reactor compartments were separated as cathode and anode. The cathode compartment was filled with wastewater and the anode compartment was filled with selected electrolyte. The two compartments were separated by two different materials; agar wall and porous glass. The study revealed that both reactor separator and electrolyte had effects on limit of applied current density and Ni(II) removal time. The time used for Ni(II) removal depends also on initial pH of solution, Ni(II) and Dimethylglyoxime concentrations. This study showed that a complete removal of 750 ppm Ni(II) ions from wastewater could be achieved within 14 min after adjusted an initial pH of solution to 1.2 and applied current density at 382 A/m^2 in the reactor that contains 0.5 M NaCl as an anode electrolyte and agar wall separator.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. สุชา ขาวเธียร ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ ดร. ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวฒิกะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขจน วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ทุกๆ ท่านภายในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านการใช้สถานที่ในการปฏิบัติงานวิจัย การใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การสนับสนุนด้านงบประมาณจาก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่ง ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญรูป..... | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของนิกเกิล | 4 |
| 2.1.2 ประโยชน์ของนิกเกิล..... | 5 |
| 2.2.1 หลักการการทดลอง | 7 |
| 2.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 8 |
| 2.4.1 ของเสียที่สามารถกำจัดได้เอง..... | 10 |
| 2.4.2 ของเสียที่ต้องทำการบำบัดก่อนทิ้ง | 10 |
| 2.4.3 ของเสียอันตรายที่ส่งกำจัด | 11 |
| 2.4.4 ของเสียกลุ่มพิเศษ | 11 |
| 2.5 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย | 12 |
| 2.5.1 การทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation)..... | 12 |

| | |
|---|----|
| 2.5.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)..... | 14 |
| 2.5.3 การกรองด้วยเมมเบรน (Membrane filtration)..... | 14 |
| 2.5.4 การดูดติดผิว (Adsorption)..... | 15 |
| 2.5.5 การแยกด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrolytic recovery)..... | 16 |
| 2.6.1 ตัวแปรทางกายภาพ (Physical variable)..... | 17 |
| 2.6.2 ตัวแปรทางเคมี (Chemical variable)..... | 18 |
| 2.7 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า..... | 19 |
| 2.7.1 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่หรือไม่ควบคุมศักย์ไฟฟ้า..... | 19 |
| 2.7.2 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่หรือแบบไม่ควบคุมกระแสไฟฟ้า..... | 20 |
| 2.8 เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell)..... | 21 |
| 2.8.1 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า..... | 21 |
| 2.8.2 ส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า..... | 22 |
| 2.8.3 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า..... | 23 |
| 2.9 หลักการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า..... | 26 |
| 2.9.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคมีไฟฟ้า..... | 27 |
| 2.9.2 การนำพาไอออนในสารละลาย..... | 28 |
| 2.9.3 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า..... | 31 |
| 2.9.4 โพลาริเซชัน..... | 33 |
| 2.11 กำลังไฟฟ้า..... | 36 |
| 2.12 ร้อยละการกำจัดโลหะหนัก (% Removal)..... | 37 |
| 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 37 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 46 |
| 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี..... | 46 |

| | |
|---|----|
| 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์..... | 46 |
| 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 48 |
| 3.1.3 การเตรียมน้ำเสียจริง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง และสะพานเกลือ .. | 48 |
| 3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองในถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลาย | 49 |
| 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย | 50 |
| 3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถังปฏิกริยาที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัด นิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี..... | 52 |
| 3.2.1.1 รูปแบบรอยต่อของสารละลาย | 52 |
| 3.2.1.2 ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด | 53 |
| 3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสถานะน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำ เสียห้องปฏิบัติการเคมี..... | 55 |
| 3.2.2.1 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย..... | 55 |
| 3.2.2.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล | 56 |
| 3.2.2.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG | 59 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ | 62 |
| 4.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถังปฏิกริยาที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิล ออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี..... | 62 |
| 4.1.1 รูปแบบรอยต่อของสารละลาย..... | 63 |
| 4.1.2 ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด | 65 |
| 4.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาสถานะน้ำเสียที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิลออก จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี..... | 68 |
| 4.2.1 ค่าพีเอชเริ่มต้น | 68 |
| 4.2.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล..... | 71 |
| 4.2.3 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, DMG)..... | 76 |

| | |
|--|-----|
| 4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัด..... | 79 |
| 4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี..... | 80 |
| 4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า | 81 |
| 4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยที่ใกล้เคียงกัน..... | 82 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 84 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 84 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 85 |
| 5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม..... | 86 |
| รายการอ้างอิง | 87 |
| ภาคผนวก..... | 92 |
| ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง | 93 |
| ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ | 107 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 113 |

สารบัญตาราง

| | | |
|--------------|--|----|
| ตารางที่ 2.1 | สมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลของโลหะนิกเกิล | 4 |
| ตารางที่ 2.2 | ตัวอย่างตัวตกตะกอนที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ใช้ในการแยกไอออนของโลหะออกจากสารละลาย | 9 |
| ตารางที่ 2.3 | มาตรฐานน้ำทิ้ง | 16 |
| ตารางที่ 2.4 | สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิลออกจากของเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า | 43 |
| ตารางที่ 3.1 | ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.1.1 การศึกษารูปแบบบรอยต์ของสารละลายที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี | 53 |
| ตารางที่ 3.2 | ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.1.2 การศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด ที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี | 54 |
| ตารางที่ 3.3 | ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.2.1 การศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี | 56 |
| ตารางที่ 3.4 | ปริมาณคลอไรด์ไอออนก่อนและหลังที่มีการเติม NaCl ลงในน้ำเสียจริงที่ทำการเจือจางแล้ว | 58 |
| ตารางที่ 3.5 | ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.2.2 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี | 58 |
| ตารางที่ 3.6 | ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.2.3 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG ที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี | 60 |
| ตารางที่ 3.7 | วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด | 61 |
| ตารางที่ 4.1 | องค์ประกอบน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี | 62 |
| ตารางที่ 4.2 | แสดงระยะเวลาการกำจัดนิกเกิลและปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ ณ เวลาที่นิกเกิลมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 0.8, 1.2 และ 1.6 | 71 |
| ตารางที่ 4.3 | แสดงร้อยละและอัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิล จนมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นมีค่าแตกต่างกัน | 73 |

| | | |
|--------------|--|----|
| ตารางที่ 4.4 | สรุปสี่และรูปแบบตะกอนที่เกิดขึ้นพร้อมค่าพีเอชของสารละลาย | 79 |
| ตารางที่ 4.5 | เปรียบเทียบข้อมูลงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ใกล้เคียง | 83 |



สารบัญรูป

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 2.1 | ของเสียนิกเกิลจากการทดลองการหาปริมาณนิกเกิลในลวดนิกโครมด้วยวิธีวิเคราะห์โดย น้ำหนัก..... | 8 |
| รูปที่ 2.2 | ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์..... | 13 |
| รูปที่ 2.3 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ ... | 20 |
| รูปที่ 2.4 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ | 20 |
| รูปที่ 2.5 | การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... | 24 |
| รูปที่ 2.6 | เซลล์ชนิดมีรอยต่อของสารละลาย แบบต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ | 25 |
| รูปที่ 2.7 | เซลล์ชนิดมีรอยต่อของสารละลายโดยใช้แผ่นแก้วรูพรุนเป็นตัวกั้นกลางระหว่าง | 25 |
| รูปที่ 2.8 | เซลล์มีรอยต่อของสารละลายแบบใช้สะพานของสารละลาย | 26 |
| รูปที่ 2.9 | องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า..... | 27 |
| รูปที่ 2.10 | การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน..... | 29 |
| รูปที่ 2.11 | การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่ | 30 |
| รูปที่ 2.12 | การเคลื่อนที่ของไอออนแบบการพา | 30 |
| รูปที่ 2.13 | กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า | 31 |
| รูปที่ 2.14 | ตัวอย่างการอัดกระแสในกระบวนการนอนพาราเดอิก..... | 32 |
| รูปที่ 2.15 | การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์เซลล์เดี่ยว | 34 |
| รูปที่ 2.16 | การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์แบบอนุกรม..... | 35 |
| รูปที่ 2.17 | การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน | 35 |
| รูปที่ 2.18 | การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์..... | 36 |
| รูปที่ 3.1 | ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลาย (ก) กั้นสารละลายด้วยผนังรู้น (ข) กั้น สารละลายด้วยแผ่นแก้วรูพรุน..... | 47 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 3.2 | ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (ก) ขั้วไฟฟ้าฝั่งแคโทด (ข) ขั้วไฟฟ้าฝั่งแอโนด..... | 47 |
| รูปที่ 3.3 | ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยผนังรู้น..... | 49 |
| รูปที่ 3.4 | ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุน..... | 50 |
| รูปที่ 3.5 | ผังการทำวิจัย..... | 51 |
| รูปที่ 4.1 | ความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ในถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อที่ใช้รูปแบบรอยต่อของสารละลายที่ต่างกัน..... | 63 |
| รูปที่ 4.2 | ร้อยละการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริงเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธี เคมีไฟฟ้า ในถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อที่ใช้รูปแบบรอยต่อของสารละลายที่ต่างกัน..... | 64 |
| รูปที่ 4.3 | ความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดต่างชนิดกัน..... | 66 |
| รูปที่ 4.4 | ร้อยละการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดต่างชนิดกัน..... | 66 |
| รูปที่ 4.5 | ความเข้มข้นนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าต่างๆกัน..... | 69 |
| รูปที่ 4.6 | ร้อยละการกำจัดนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าต่างๆกัน..... | 70 |
| รูปที่ 4.7 | ความเข้มข้นนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นแตกต่างกัน..... | 72 |
| รูปที่ 4.8 | ร้อยละการกำจัดนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นแตกต่างกัน..... | 72 |
| รูปที่ 4.9 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นนิกเกิลและค่าพีเอชเทียบกับเวลา เมื่อนิกเกิลมีค่า ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน..... | 75 |
| รูปที่ 4.10 | ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์..... | 75 |
| รูปที่ 4.11 | ความเข้มข้นนิกเกิลและค่าพีเอชของสารละลายเทียบกับเวลา เมื่อมีค่าอัตราส่วนโมล DMG ในสารละลายที่ต่างกัน..... | 76 |
| รูปที่ 4.12 | สีของตะกอนที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง ณ นาทีที่ 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 เมื่อ อัตราส่วนโมล Ni^{2+} :DMG เป็น (ก) 1:0.65 (ข) 1:1.3..... | 77 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ห้องปฏิบัติการเคมีเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียแหล่งหนึ่งที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก เนื่องจากสถาบันการศึกษาหลายแห่งมีการจัดการเรียนการสอนภาคปฏิบัติในวิชาเคมีวิเคราะห์และมีการวิจัยจำนวนมาก ซึ่งมีการนำโลหะหนักมาใช้วิเคราะห์ผลทางเคมี โลหะหนักจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียของห้องปฏิบัติการเคมี และเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม น้ำเสียดังกล่าวจึงต้องผ่านการกำจัดโลหะหนักออกก่อน เพื่อให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนด ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก

นิเกิลเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี และเนื่องจากนิเกิลไม่สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ การปล่อยน้ำเสียที่มีนิเกิลปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม จะส่งผลให้เกิดการสะสมของนิเกิลในดินและน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระทบต่อวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิต และต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ เช่น ทำให้ผิวหนังอักเสบ ปอดเป็นพังผืด เป็นโรคหัวใจ โรคไต เป็นต้น (Kasprzak และคณะ, 2003) โดยมนุษย์มีโอกาสสัมผัสกับนิเกิลได้หลายทาง ได้แก่ ทางอากาศ น้ำ และอาหาร (Denkhaus และ Salnikow, 2002) การกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรตระหนักถึง

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีโดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้าด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งข้อดีของวิธีดังกล่าวคือ ไม่จำเป็นต้องมีการแยกสารรบกวนอื่นๆออกก่อนการบำบัด ไม่มีการเติมสารเคมีเพิ่มเติม ซึ่งเป็นการลดการเพิ่มมลพิษ รวมทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และตะกอนนิเกิลที่เกิดขึ้นในรูปของโลหะบนขั้วไฟฟ้าจะมีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อย สามารถนำไปขายเพื่อเพิ่มรายได้ เพราะนิเกิลจัดเป็นโลหะหนักที่มีค่า (Coman และคณะ, 2013) ใช้เป็นแนวทางในการนำนิเกิลกลับมาใช้ใหม่ได้ในอนาคต นอกจากนี้ยังเกิดตะกอนนิเกิลออกไซด์และนิเกิล(II)ไฮดรอกไซด์อีกด้วย ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนำมาขายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตนิเกิลซัลเฟต เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมชุบโลหะและอุตสาหกรรมเซรามิก (Mansi- Al และ Monem- Abdel, 2002)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ได้แก่ รูปแบบรอยต่อของสารละลาย และชนิดของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอโนด

1.2.2 ศึกษาสภาวะน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิล ได้แก่ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล และความเข้มข้นเริ่มต้นของไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, DMG) ตามลำดับ

1.2.3 หาความสามารถในการกำจัดนิกเกิล แล้วประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบการพอกพูนด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 งานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์จากการทดลองการหาปริมาณของนิกเกิลในลวดนิกโครมด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก

1.3.3 บำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch process)

1.3.4 เปรียบเทียบรูปแบบถึงปฏิกิริยาที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสีย ได้แก่ รูปแบบรอยต่อของสารละลาย และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอโนด และศึกษาสภาวะน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิล โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล และความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG ตามลำดับ

1.3.5 วัดความเข้มข้นของนิกเกิลด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอซันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประเมินความสามารถในการกำจัดนิกเกิล

1.3.6 คำนวณค่าสารเคมี และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่

1.4.2 สามารถกำหนดสถานะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสีย ในเวลาที่รวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่าย

1.4.3 เป็นแนวทางในการนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ในอนาคต

1.4.4 ทราบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณของการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิกเกิล (กิตติพันธ์ บายีชัน, 2557)

2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของนิกเกิล

นิกเกิลมีคุณสมบัติด้านความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เนื่องจากการที่นิกเกิลมีความอ่อนตัวและความเหนียวมาก ทำให้สามารถทำการขึ้นรูปในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำได้ง่าย โดยในอดีตนิกเกิลถูกค้นพบด้วยวิธีการสกัดโลหะออกจากแร่ธาตุเป็นครั้งแรกเมื่อประมาณ 250 ปีที่ผ่านมา โลหะนิกเกิลมีสีขาวยเงิน มีความคล้ายคลึงกับทองในด้านมีการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี นอกจากนี้ยังมีความคล้ายคลึงกับเหล็กด้านความแข็งแรงอีกด้วย

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลของโลหะนิกเกิล

| สมบัติทางฟิสิกส์ | |
|--|--------------------------------|
| น้ำหนักอะตอม | 58.69 |
| โครงสร้างระบบผลึก | สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ |
| ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส | 8.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| จุดหลอมเหลว | 1,455 องศาเซลเซียส |
| จุดเดือดกลายเป็นไอ | 2,913 องศาเซลเซียส |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัว ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส | 13.4 ไมโครเมตรต่อเมตรต่อเคลวิน |
| สมบัติเชิงกล | |
| โมดูลัสของความยืดหยุ่น | 200 จิกะปาสคาล |
| โมดูลัสของแรงเฉือน | 76 จิกะปาสคาล |
| ความแข็งแรงแบบบริเนล | 700 เมกะปาสคาล |

ที่มา : (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2551)

2.1.2 ประโยชน์ของนิกเกิล

โลหะนิกเกิลส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม นอกจากนั้นยังใช้ในงานที่ต้องทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก ซึ่งตัวอย่างการนำโลหะนิกเกิลไปใช้ประโยชน์มีดังนี้

- 1) ใช้เป็นวัสดุกรองในอุตสาหกรรมเคมีและการกลั่นน้ำมัน ใช้ทำมาตรฐานน้ำประตุน้ำ ท่อสำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อน
- 2) ใช้ทำโลหะผสมชนิดพิเศษ (Superalloy) ซึ่งทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงและต้านทานความเค้นสำหรับอุตสาหกรรมอากาศยาน โดยใช้เป็นวัสดุในการผลิตอุปกรณ์รักษาระดับความดันอากาศ ชิ้นส่วนต่างๆ และเครื่องยนต์ของเครื่องบินไอพ่น
- 3) ใช้เคลือบผิวเครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น เตาไฟฟ้า หม้อหุงข้าว เตาปิ้งขนมปัง เครื่องเป่าผม ซ่อมส้อม จาน ภาชนะ และอุปกรณ์การทำอาหาร เป็นต้น
- 4) อาศัยคุณสมบัติการยึดติด การต้านแรง และคุณลักษณะการออกซิเดชันเพื่อใช้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หลอดสุญญากาศ หลอดโทรทัศน์ และใช้ทำขั้วแอโนด แคโทด และลวดยึดในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 5) จากคุณสมบัติที่สามารถดูดติดแม่เหล็กได้จึงใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น เครื่องแปลงกำลังสำหรับพลังงานอัลตราโซนิก อุปกรณ์การสำรวจใต้น้ำในอุตสาหกรรมการเดินเรือ อุปกรณ์ทำความสะอาดชิ้นงานก่อนเคลือบผิวในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ
- 6) ใช้ทำสปริงแบนในระบบถ่ายทอดโทรศัพท์ ปลั๊กไฟซึ่งทนการกัดกร่อน จอแม่เหล็ก แกนเหนียวนำในคลื่นเสียงวิทยุ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในมอเตอร์ไซค์ รถยนต์ และมอเตอร์กระแสตรงขนาดใหญ่ นิกเกิลผงที่อัดเป็นแท่งใช้ในแบตเตอรี่ที่มีสารละลายเป็นด่างซึ่งใช้ในเครื่องบิน
- 7) ในการก่อสร้างมีการใช้นิกเกิลในรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อทำอุปกรณ์ประดับอาคาร เนื่องจากมีความต้านทานการกัดกร่อน แข็งแรง และให้ความสวยงาม

2.1.3 อันตรายจากนิกเกิล (สิริวิชญ์ เดชธรรม, 2557)

1. กลไกการทำให้เกิดโรค

ในภาคอุตสาหกรรม นิกเกิลเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจมากที่สุด และสามารถเข้าสู่ร่างกายทางการกิน และทางผิวหนังได้บ้างการเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ โดยสูดเอา ฝุ่นละอองของสารประกอบนิกเกิลที่ไม่สามารถละลายได้ ละอองของเหลวของสารละลายนิกเกิล และก๊าซ อัตรา

การดูดซึมขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะสะสมที่ปอดและต่อมน้ำเหลือง เป็นส่วนใหญ่ และกระจายไปอวัยวะอื่นผ่านกระแสเลือด การขับออกจากร่างกาย ขับออกทาง ปัสสาวะ

2. การเตรียมตัวเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน

สารประกอบนิกเกิลทั่วไปไม่เป็นพิษแบบเฉียบพลัน สารประกอบนิกเกิลที่ ก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันคือ นิกเกิลคาร์บอนิล (Nickel carbonyl) ซึ่งมีแนวทางในการปฐมพยาบาล เบื้องต้นดังนี้คือ หยุดการสัมผัส นำผู้ป่วยออกมาจากแหล่งสัมผัส ผู้ช่วยเหลือต้องป้องกันตัวเองด้วยการสวมอุปกรณ์ป้องกัน และควรได้รับการฝึกฝนมาเป็นอย่างดี หากผู้ป่วยหมดสติ ต้องเปิดช่องทางเดินหายใจ (clear airway) และให้ออกซิเจน

3. อาการ

■ อาการเฉียบพลัน

อาการจากการสูดหายใจ (inhalation effect) การสูดสารประกอบ นิกเกิลอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองคอและมีอาการเสียงแหบในขณะที่การสูดดม จะทำให้เกิดผล ต่อร่างกายทั้งระบบ อาการจากการสัมผัสทางผิวหนัง (dermal effect) จะมีอาการแสบร้อน ระคาย เคือง และตามด้วยรอย ซึ่งอาจจะแตกเป็นแผลเป็นได้ รอยโรคอาจจะกระจายไปยังบริเวณข้างเคียงที่ เป็นพื้นที่เคลื่อนไหว เช่น ข้อพับ เปลือกตาเป็นต้น รอยโรคอาจจะมีสีคล้ำขึ้นหรือจางลงก็ได้ อาการ จากการสัมผัสเมื่อเข้าตา (eye effect) โลหะนิกเกิล ทำให้เกิดการระคายเคืองดวงตา และอาการจาก การสัมผัสทางการกิน (oral effect) โดยการกินในปริมาณมากทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวด ท้อง และท้องเสีย การกินสารประกอบนิกเกิล อาจทำให้มีอาการไอ หายใจไม่ออก และเวียนศีรษะมี รายงานว่ามีการทำลายท่อไตส่วนต้น (proximal convoluted tubules) จากการกินสารประกอบ นิกเกิล

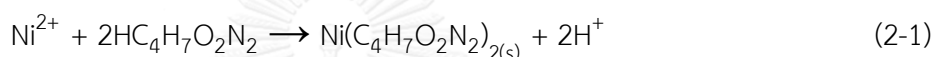
■ อาการระยะยาว

การสัมผัสฝุ่นนิกเกิล (nickel dust) เป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดการ ระคายเคืองเยื่อจมูก และเกิดผนังจมูกทะลุ (nasal septum perforation) ในบางรายอาจสูญเสีย การรับกลิ่น การสัมผัสแบบเรื้อรังเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งในโพรงจมูก ไชน์ส และปอดได้ องค์การวิจัยโรคมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer, IARC) กำหนดให้สารประกอบนิกเกิล (nickel compound) เป็นสารก่อมะเร็งสำหรับมนุษย์กลุ่มที่ 1 คือ ยืนยันแน่นอนว่าเป็นสารก่อมะเร็ง และกำหนดให้โลหะนิกเกิล (nickel metallic and alloy) จัดอยู่ในกลุ่มที่ 2บี คืออาจจะเป็นสารก่อมะเร็ง

2.2 น้ำเสียจากการทดลองการหาปริมาณของนิกเกิลในลวดนิกโครมด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (พรพรรณ อุดมกาญจนนันท์ และ สุชาติ จุณวัฒน์กุล, 2551)

2.2.1 หลักการการทดลอง

นิกเกิล (Ni(II)) ทำปฏิกิริยากับไดเมทิลไกลออกซิม โดยการปรับสภาวะละลายให้เป็นเบสด้วยแอมโมเนีย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2-1) จะเห็นได้ว่าการรวมตัวกันของโลหะนิกเกิลและไดเมทิลไกลออกซิม จะทำให้เกิดตะกอนสีแดงเป็นสารประกอบเชิงซ้อน มีสูตรคือ $\text{Ni}(\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{N}_2)_2$



นอกจากไดเมทิลไกลออกซิมจะเป็นรีเอเจนต์ที่ตกตะกอนร่วมกับโลหะนิกเกิลในสภาวะพีเอชเป็นเบสแล้ว ยังเป็นรีเอเจนต์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาร่วมกับแพลเลเดียมในสภาวะกรดอีกด้วย จึงไม่เกิดการรบกวนปฏิกิริยาต่อกัน แต่ถ้าสารละลายมีโลหะเหล็กเป็นองค์ประกอบร่วมด้วยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่รบกวนการวิเคราะห์ได้ โดยจะเกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ และตกตะกอนรวมออกมา กับตะกอนนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิม แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมกรดซिटริกหรือทาร์ทาริกเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนร่วมกับเหล็ก และไม่เกิดการตกตะกอนร่วมกับนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิม

ไดเมทิลไกลออกซิมมีสมบัติคือ ไม่ละลายในน้ำ แต่จะละลายได้ดีในสารละลายที่มีแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย และแอลกอฮอล์สามารถละลายตะกอนนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิมได้ด้วย ดังนั้น การเติมรีเอเจนต์ไดเมทิลไกลออกซิมที่มีแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายลงไป ในสารละลายต้องเติมให้มีปริมาณที่เพียงพอหรือมากเกินไป เพื่อที่จะตกตะกอนโลหะนิกเกิลออกมาให้หมด แต่จะต้องไม่เติมในปริมาณที่มากเกินไป เนื่องจากแอลกอฮอล์จะทำการละลายตะกอนออกไปมากด้วย แอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นตัวทำละลายไดเมทิลไกลออกซิมคือ เอทานอล

ตะกอนสีแดงเข้มของนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิมมักจะลอยตัวอยู่ในสารละลาย จะทำให้กรองตะกอนออกจากสารละลายได้ยาก มีลักษณะไม่ชอบน้ำ (ไฮโดรโฟบิก) ดังนั้นจึงไม่ควรฉีดน้ำล้างให้ตะกอนตกลงไป ตะกอนสีแดงของนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิมนี้ มีความอยู่ตัวถึงอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และการอบตะกอนให้แห้งมักจะทำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

2.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, $\text{HC}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{N}_2$)
- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)
- แอมโมเนีย (Ammonia, NH_3)
- เอทานอล (Ethanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)

โดยของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองการหาปริมาณนิกเกิลในลวดนิกโครมด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก จะเกิดของเสียนิกเกิลขึ้น 2 ส่วน ได้แก่ ตะกอนสีแดงของไดเมทิลไกลออกซิม และสารละลายสีเขียวอ่อนหลังจากการตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ของเสียนิกเกิลจากการทดลองการหาปริมาณนิกเกิลในลวดนิกโครมด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก

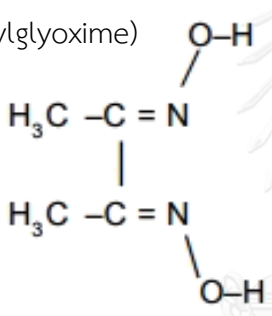
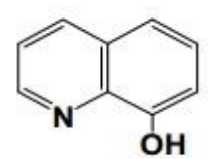
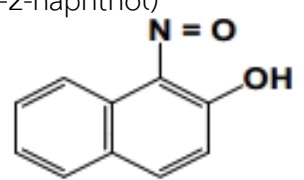
2.3 ตัวตกตะกอนอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (ธวัชชัย ศรีวิบูลย์, 2547)

ในปี ค.ศ. 1905 Tschugaeff ได้พบว่า ไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime) สามารถใช้ตกตะกอนกับนิกเกิลได้โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นเป็นครั้งแรก ต่อจากนั้นได้มีการพัฒนาและค้นคว้าหาสารอินทรีย์ตัวอื่นๆ ที่สามารถตกตะกอนได้ การศึกษาค้นคว้าทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะกับสารอินทรีย์ และทำให้ทราบโครงสร้างของสารประกอบ ออแกโนเมทัลลิก (organometallic compound) ที่เกิดขึ้นด้วย

สารประกอบออกาโนเมทัลลิกที่เกิดขึ้นต้องมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีลักษณะเป็นคีเลต (Chelate compound) สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดตะกอนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดคีเลต ต้องมีหมู่ฟังก์ชันนอล (Functional groups) เป็นหมู่อะซิติก (acidic group) คือมีหมู่ $-H$ และ $-OH$

ตัวตกตะกอนอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสารประกอบคีเลตกับไอออนของโลหะมีหลายชนิด ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกไอออนของโลหะต่างๆ ออกจากกันได้ ตัวอย่างของตัวตกตะกอนอินทรีย์ที่ใช้ในการแยกไอออนของโลหะต่างๆ ออกจากกันแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างตัวตกตะกอนที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ใช้ในการแยกไอออนของโลหะ ออกจากสารละลาย

| ตัวตกตะกอน | ใช้สำหรับตกตะกอน |
|---|--|
| 1) ไดมethylไกลออกซิม (Dimethylglyoxime)  | เป็นของแข็งสีขาว มีมวลโมเลกุล 116.12 กรัมต่อโมล สามารถละลายได้ในตัวทำละลายหลายประเภท เช่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน อีเทอร์ และไพริดีน ใช้ตกตะกอนนิกเกิลเป็น $Ni(DMG)_2$ ที่พีเอช เท่ากับ 5 - 9 โดยที่พีเอชเท่ากับ 1 สามารถตกตะกอน $Pd(DMG)_2$ ได้โดยที่ไม่ตกตะกอน Ni^{2+} |
| 2) 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน หรือออกซีน (hydroxyquinoline or Oxine)  | ใช้ตกตะกอนแคตไอออนได้ทุกตัว การแยกสามารถทำได้โดยการควบคุมพีเอช ใช้ในการแยก Al^{3+} ที่พีเอชเท่ากับ 4-10 ได้ดี และแยก Mg^{2+} ที่ พีเอชเท่ากับ 8-13 ได้ดี |
| 3) 1-ไนโตรโซ-2-เนฟทอล (1-Nitroso-2-naphthol)  | ใช้ตกตะกอน Co^{2+} , Cu^{2+} , Pd^{2+} และ Fe^{3+} ใช้ในการแยก Co^{2+} จาก Ni^{2+} ได้โดยการออกซิไดซ์ Co^{2+} เป็น Co^{3+} แล้วตกตะกอนจากนั้นนำตะกอนไปเผาเป็น Co_3O_4 |

ที่มา : (วัชชัย ศรีวิบูลย์, 2547)

2.4 การจัดการของเสียห้องปฏิบัติการภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สุทธิพร จิตต์มิตรภาพ, 2551)

รูปแบบการจำแนกของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ ในการรวบรวมชนิด ปริมาณและการจัดการเบื้องต้น รวมถึงการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการจัดทำฐานข้อมูลของเสีย ให้ชื่อว่า โปรแกรมการจัดการของเสียอันตราย (Waste Track) ทำงานบนระบบเครือข่าย เพื่อให้สะดวกต่อการเข้าถึงของห้องปฏิบัติการทุกห้อง โดยผู้ใช้สามารถบันทึกและปรับปรุงข้อมูลของเสียอันตรายได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว และนำไปสู่การจัดส่งเพื่อนำไปบำบัดต่อไป รวมถึงเพื่อให้หน่วยงานภายใต้จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีรูปแบบการจัดเก็บของเสียอันตราย ของห้องปฏิบัติการต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

หน่วยงานพิเศษสำหรับการจัดการของเสียอันตราย ให้คำแนะนำห้องปฏิบัติการต่างๆ ในการจำแนกของเสียอันตรายออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

2.4.1 ของเสียที่สามารถกำจัดได้เอง

รายการของเสียที่สามารถกำจัดได้ ได้แก่ เกลือของโลหะที่ไม่เป็นพิษและไม่มีไอออนลบที่เป็นพิษหรือมีอันตรายอย่างอื่น ของเสียที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย และมีสารอินทรีย์ หรืออินทรีย์ที่ไม่เป็นพิษละลายอยู่ไม่เกินร้อยละ 5 สามารถทิ้งลงท่อน้ำทิ้งได้ และของแข็งที่ไม่มีสารเป็นพิษหรือมีอันตรายอย่างอื่น เช่น เศษแก้วที่สะอาด กระดาษกรอง ตัวดูดน้ำ เป็นต้น สามารถทิ้งลงถังขยะได้

2.4.2 ของเสียที่ต้องทำการบำบัดก่อนทิ้ง

รายการของเสียที่ควรบำบัดก่อนทิ้ง หมายถึง ของเสียที่สามารถกำจัดได้เองแต่ควรมีการบำบัดเบื้องต้นก่อนทิ้ง และของเสียที่ต้องนำส่งเป็นของเสียอันตรายแต่มีปริมาณน้อย วิธีบำบัดของเสียอันตรายในเบื้องต้น ได้แก่ สารละลายกรดและเบส ต้องทำให้เป็นกลางแล้วทิ้งลงท่อน้ำ พร้อมทั้งเปิดน้ำตามในปริมาณมากๆ ตัวออกไซด์ ต้องรีดิวซ์ด้วยตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสมก่อนนำส่งเป็นของเสียหรือทิ้งลงท่อน้ำตามความเหมาะสม สารไวต่อน้ำหรืออากาศต้องทำลายด้วยน้ำหรือกรดอ่อน เช่น สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ หรือสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนต แล้วนำส่งเป็นของเสีย หรือทิ้งลงท่อน้ำตามความเหมาะสม ของแข็งที่มีตัวทำละลายอินทรีย์ปนอยู่ เช่น ซิลิกาที่เหลือจากการทำ

โครมาโทกราฟี (Chromatography) ต้องผึ่งให้แห้งแล้วทิ้งเป็นของเสียที่เป็นของแข็ง และสารละลายที่ปนเปื้อนโลหะหนักปริมาณน้อย (น้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะต้องทำให้เข้มข้นขึ้นโดยการตั้งทิ้งไว้ให้ระเหย แล้วทิ้งในสภาพที่เป็นสารละลายเข้มข้น

2.4.3 ของเสียอันตรายที่ส่งกำจัด

แบ่งออกเป็น 8 ประเภทหลัก ได้แก่

- ของเสียที่มีสารโครเมต (Chromate Waste)
- ของเสียที่มีโลหะหนัก (Heavy Metal Waste)
- ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Petroleum Products)
- สารเคมีที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง (Oxygenated)
- ของเสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ (NPS Containing)
- สารประกอบฮาโลเจน (Halogenated)
- ของแข็งที่เผาไหม้ได้ (Combustible Solid) และของแข็งที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Incombustible Solid)
- ของเสียที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Miscellaneous Aqueous Waste)

2.4.4 ของเสียกลุ่มพิเศษ

ของเสียกลุ่มพิเศษ ได้แก่ สารกัมมันตรังสี ของเสียติดเชื้อ และแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ ซึ่งมีระบบการดำเนินงานเฉพาะเรื่องอยู่แล้ว ผู้ที่มีของเสียอันตรายเหล่านี้ในครอบครองควรติดต่อกับหน่วยงานที่รับผิดชอบ

โดยของเสียที่ได้จากห้องปฏิบัติการเคมีจัดเป็นของเสียอันตรายที่จะถูกส่งออกไปกำจัดภายนอกมหาวิทยาลัย ของเสียภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมาจาก 5 แหล่ง คือ ภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี และศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ซึ่งของเสียจะถูกส่งไปยังหน่วยงานพิเศษสำหรับการจัดการของเสียอันตรายภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจะถูกส่งต่อไปบำบัดภายนอกที่บริษัท แวกซ์ กาเบิ้ลรีไซเคิลเซ็นเตอร์ จำกัด โดยในระยะเวลาตั้งแต่ เดือนมีนาคม – กันยายน 2549 สามารถจัดการของเสียอันตรายส่งไปบำบัดได้ จำนวน 4,561.1 ลิตร และ 227.0 กิโลกรัม จากห้องปฏิบัติการ 63 แห่ง

2.5 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

วิธีการบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับสิ่งที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียมีหลายประเภท การเลือกใช้ระบบใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ลักษณะของน้ำเสีย ระบบการบำบัด และสภาพท้องถิ่น โดยไม่ว่าจะเลือกใช้ระบบใดก็ตาม จะต้องเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพและต้องมีราคาประหยัด ลักษณะของน้ำเสียและระดับการบำบัดจะเป็นเครื่องกำหนดอย่างกว้างๆถึงระบบการบำบัดน้ำเสียที่อาจนำมาใช้ได้ ในกรณีที่น้ำเสียมีความสกปรกอยู่ในรูปของสารละลายอนินทรีย์ต่างๆ เช่น โลหะหนักหรือสารพิษ การบำบัดน้ำเสียมักใช้กระบวนการทางเคมีเสมอ กระบวนการทางชีวภาพไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหรือสารพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าการลงทุน (ปทุมทิพย์ เสมอภาค และคณะ, 2550) การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนมีหลายวิธีที่นิยมใช้ ดังนี้

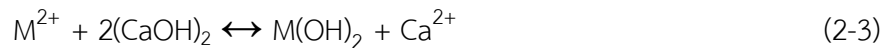
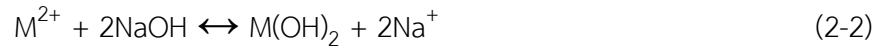
2.5.1 การทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นกระบวนการที่เติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนบวกที่มีอยู่ทำให้เกิดการตกตะกอนกับตัวตกตะกอนไอออนลบ จำพวก ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ออกซาเลต ฟอสเฟต และคาร์บอเนต ก่อให้เกิดเป็นตะกอนที่แยกออกจากน้ำเสียได้ ทำได้โดยการควบคุมค่าพีเอชของสารละลาย ทั้งนี้เพราะไอออนลบเหล่านี้เป็นไอออนลบของกรดอ่อน การควบคุมความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน หรือค่าพีเอชของสารละลายจึงมีผลทำให้สามารถควบคุมความเข้มข้นของไอออนลบเหล่านี้ได้ ถ้าค่าผลคูณของการละลายของโลหะต่างๆ ที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ ออกซาเลต ฯลฯ มีค่าต่างกันจะทำให้สามารถตกตะกอนแยกไอออนของโลหะออกมาได้ เพราะการควบคุมพีเอช ทำให้ความเข้มข้นของตัวตะกอนเหมาะสมสำหรับการตกตะกอนไอออนของโลหะต่างๆ (นงเยาว์ จโนภาส, 2546)

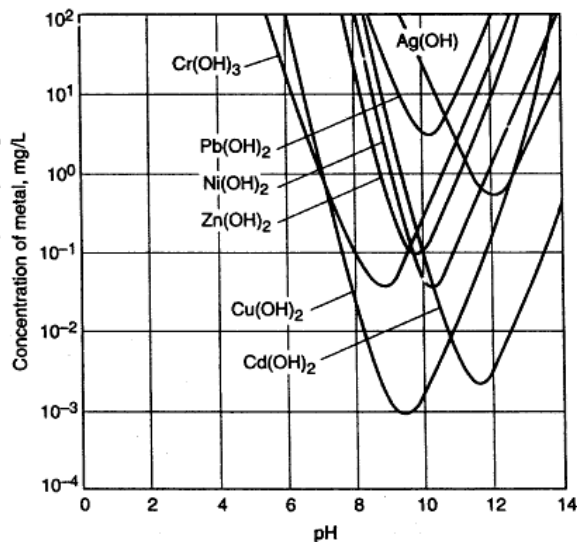
1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว จะมีค่าต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และบางครั้งอาจต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรก็ได้ โลหะไฮดรอกไซด์เป็นพวกแอมโฟเทอริก (Amphoteric) คือ ที่พีเอชสูงและต่ำกว่าสามารถเพิ่มการละลายได้ โลหะต่างชนิดจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมต่างกันสำหรับการละลายต่ำสุด สำหรับน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดปนกันอยู่ การตกตะกอนของผลึกโลหะหนักแต่ละชนิด อาจจะใช้ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ดังนั้นการที่จะควบคุมความเข้มข้นของโลหะหนักทุกตัวที่ออกจากน้ำเสียให้มีระดับตามต้องการ อาจจำเป็นต้องใช้การตกตะกอน

ผลึกอื่นที่อาจเป็นไปได้ ใช้สารตกตะกอนคือ โซดาไฟ (NaOH) หรือปูนขาว (CaOH)₂ จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-2) และ (2-3) โดย M²⁺ แทนโลหะประจุบวกทั้งหมด



ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ แสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับการสร้างตะกอนของนิกเกิล(II)ไฮดรอกไซด์ โดยนิกเกิลที่อยู่ในรูป Ni²⁺ แล้ว สามารถสร้างตะกอนแข็งในรูปของ Ni(OH)₂ ได้ โดยปรับพีเอชให้ได้ประมาณ 9-12 ซึ่งเป็นช่วงที่นิกเกิลตกตะกอนเป็นโลหะออกไซด์มากที่สุด



รูปที่ 2.2 ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ (Metcalf และ Eddy, 2003)

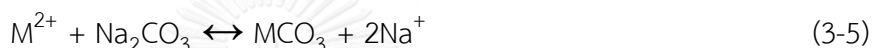
2. การตกตะกอนซัลไฟด์

ใช้สารตกตะกอน คือ โซเดียมซัลไฟด์ สูตรทางเคมี คือ Na₂S หรือ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ สูตรทางเคมี คือ NaHS และ เฟอร์รัสซัลไฟด์ สูตรทางเคมี คือ FeS ซึ่งละลายน้ำได้เล็กน้อย โดยทำการเติมลงในสารละลายเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออน จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (3-4)



3. การตกตะกอนออกซาเลต ฟอสเฟต และคาร์บอเนต

แอนไอออนทั้งสามตัวนี้สามารถตกตะกอนกับแคทไอออนได้หลายตัว แต่เนื่องจากค่า ผลคูณของการละลายของตะกอนที่เกิดจากแอนไอออนเหล่านี้มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทำให้การควบคุมพีเอชเพื่อให้ความเข้มข้นของแอนไอออนเหล่านี้ต่างๆ กันนั้นยังไม่เพียงพอที่จะทำให้การแยกเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น การตกตะกอนจึงต้องมีการแยกด้วยวิธีอื่นมาขึ้นหนึ่งก่อน เช่น การแยกแคลเซียมออกจากแมกนีเซียมและโลหะอัลคาไลด์ ยกตัวอย่างปฏิกิริยาการตกตะกอนคาร์บอเนตดังสมการที่ (3-5) โดยนิยมทำการตกตะกอนในสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน



2.5.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

เป็นวิธีการที่ไอออนที่ไม่ต้องการจะถูกแทนที่โดยไอออนอื่นที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Dabrowski และคณะ, 2004) ใช้เรซิน (Resin) เป็นตัวแยกไอออนของโลหะออกมา โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างน้ำเสียที่มีไอออนต่างๆ ของโลหะหนัก กับไอออนบนผิวของเรซิน ทำให้ไอออนโลหะหนักของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเกาะอยู่ที่ผิวของเรซิน โดยเรซินที่ใช้ในการแยกโลหะหนักนั้น คือ แคทไอออนเรซิน (Cationic Resin) วิธีการนี้แม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีค่าใช้จ่ายมากเนื่องจากเรซินมีราคาแพง นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง และการปนเปื้อนของโลหะหลายชนิด จึงนิยมเป็นกระบวนการบำบัดขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้น้ำทิ้ง (Effluent) มีความสะอาดสูง มีการปนเปื้อนของโลหะในปริมาณที่ต่ำมาก

2.5.3 การกรองด้วยเมมเบรน (Membrane filtration)

วิธี Membrane filtration สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration)

เป็นวิธีที่ใช้เมมเบรนที่ยอมให้น้ำและตัวทำละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็กไหลผ่านไปได้ โดยกักโมเลกุลขนาดใหญ่และไอออนโลหะหนักที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูเมมเบรนเอาไว้ ขนาดรูเมมเบรนเท่ากับ 3 ถึง 20 นาโนเมตร (Fu และ Wang, 2011)

2. การแพร่ย้อนกลับ (Reverse osmosis)

เป็นวิธีที่ใช้แรงดันขับเคลื่อนสารผ่านเมมเบรน โดยน้ำจะผ่านเมมเบรนอย่างอิสระ ส่วนสารประกอบไอออนโลหะหนักจะถูกกักเก็บไว้ ขนาดรูเมมเบรนของการการแพร่ย้อนกลับอาจเล็กถึง 0.1 นาโนเมตร (Bohdziewicz และคณะ, 1999) ใช้กับสารละลายที่มีไอออนโลหะหนักน้อย การที่นำน้ำเสียผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันก่อน จะช่วยลดการเกิดตะกอนบนเมมเบรน การแพร่ย้อนกลับ และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ (Qin และคณะ, 2002)

3. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

ประสิทธิภาพการแยกขึ้นอยู่กับขนาดของรูเมมเบรนและกลุ่มลวดดึงผิวขั้วลบ เมมเบรนที่ใช้สำหรับนาโนฟิลเตรชัน อาจเรียกได้ว่าเป็นเมมเบรนสำหรับการแพร่ย้อนกลับความดันต่ำ (Van และ Vandecasteele, 2003)

2.5.4 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นวิธีที่สารสามารถติดโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ สารถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดติดผิว กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้

2.5.5 การแยกด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยเคมีไฟฟ้า เป็นการผ่านกระแสไฟฟ้าลงสู่น้ำเสียผ่านทางขั้วไฟฟ้า เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยไม่ต้องเติมสารเคมีลงไป เมื่อพลังงานในรูปศักย์ที่ให้กับเซลล์มีค่ามากกว่าศักย์แตกตัว เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของไอออนในสารตัวอยู่ยาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการแยกด้วยเคมีไฟฟ้านี้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในสารละลายคือ ความเข้มข้นของตัวปฏิกิริยาที่ลดลงตามสัดส่วนของผลปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี การแยกโลหะด้วยเคมีไฟฟ้าของสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดี ทำให้การแยกโลหะเกิดได้ดีขึ้น และควรมีการกวนสารละลายในถังปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวลสารได้ดีบริเวณขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ผิวของขั้วแคโทดและขั้วแอโนด จะส่งผลต่อความสามารถในการเข้าเกาะของโลหะเป็นอย่างมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปโลหะบริสุทธิ์ หรือโลหะผสม (Alloy) เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ หรือนำไปขายในเชิงพาณิชย์ โดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าสามารถแยกโลหะได้ประมาณ 90 ถึง 95 %

สำหรับน้ำเสียผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว ก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต้องมีค่าพารามิเตอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานน้ำทิ้ง

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | ค่ามาตรฐาน |
|---------------------------|------------------------------|
| 1. ค่าพีเอช (pH Value) | 5.5 - 9.0 |
| 2. อุณหภูมิ (Temperature) | ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส |
| 3. นิกเกิล (Ni^{2+}) | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร |

ที่มา: (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

กระบวนการเคมีไฟฟ้าเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะได้ดี โดยไอออนโลหะในน้ำเสียจะถูกกำจัดอยู่ในรูปของโลหะบนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ และเกิดตะกอนของโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีที่จะใช้ในการศึกษาการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจะขอกล่าวรายละเอียดของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

2.6 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการเคมีไฟฟ้า (ธวัชชัย ศรีวิบูลย์, 2548)

การเกาะตัวของโลหะที่ขั้วจะมีลักษณะอย่างไรขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ชนิด ได้แก่

2.6.1 ตัวแปรทางกายภาพ (Physical variable)

1. การเกิดแก๊ส (Gas evolution)

ถ้ามีแก๊สเกิดขึ้นที่บริเวณขั้วไฟฟ้าระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี จะทำให้โลหะเกาะได้ไม่แน่น แก๊สมีลักษณะเป็นโพรงคล้ายฟองน้ำ โดยปกติแก๊สที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ แก๊สไฮโดรเจน การป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนทำได้โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแคโทด ไม่ให้มีค่าเป็นลบมากเกินไป หรือโดยการเติมสารที่ป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจน เรียกว่า แคโทดติโพลาริเซอร์ (Cathode depolarizer)

2. ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density)

ในการเกาะโลหะที่ขั้วไฟฟ้าพบว่า ถ้าอัตราเร็วของการเกาะมีค่ามากจะทำให้ขนาดของโลหะที่เกาะเป็นผงเล็กๆ เกาะไม่แน่นและเปราะ ซึ่งเป็นหลักการเกี่ยวกับการตกตะกอน ถ้าอัตราเร็วของการตกตะกอนมีค่ามาก จะทำให้ตะกอนที่ได้มีขนาดเล็กและไม่บริสุทธิ์ อัตราเร็วของการเกาะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าควรมีค่าสูงพอประมาณ เพื่อให้โลหะเกาะที่ขั้วไฟฟ้าได้แน่นและเรียบ ถ้าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงเกินไป จะทำให้เกิดแก๊สที่ขั้วไฟฟ้าได้ แต่ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานเกินไป หรือบางทีไม่เกิดการเกาะโลหะขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเลย

3. การกวนสารละลาย (Stirring)

การกวนสารละลายช่วยลดการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในกระบวนการเคมีไฟฟ้า ดังนั้นต้องมีการกวนสารละลายทุกครั้งที่ทำทดลอง

4. อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่ออุณหภูมิสูงทำให้ไอออนในสารละลายเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดได้เร็วขึ้น เป็นการลดการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น และทำให้ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวน้อยลงด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงสารละลายจะมีความหนืดน้อยลง อุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการทดลอง

2.6.2 ตัวแปรทางเคมี (Chemical variable)

1. ผลของ pH (Effect of pH)

ไอออนที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าไฮโดรเจนไอออน เช่น Cu^{2+} และ Ag^+ สามารถเกิดกระบวนการเคมีไฟฟ้าและเข้าเกาะที่ขั้วไฟฟ้าได้ในสารละลายที่เป็นกรด โดยที่ไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นรบกวน ส่วนพวกที่ถูกรีดิวซ์ได้ยากกว่าไฮโดรเจนไอออนเช่น Ni^{2+} และ Cd^{2+} ควรทำการวิเคราะห์ในสารละลายที่เป็นกลางหรือเบส เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจน

2. ผลของความเข้มข้น (Effect of concentration)

จากสมการเนินสต์ดังสมการที่ (2-6) จะเห็นได้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งปฏิกิริยาจะมีค่าเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน

$$E = E^0 - \frac{0.0591}{n} \log \frac{1}{[M^{n+}]} \quad (2-6)$$

โดย

$$\begin{aligned} E &= \text{ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คาดคะเน} \\ E^0 &= \text{ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน} \\ n &= \text{จำนวนโมลอิเล็กตรอนที่ทำปฏิกิริยา} \\ [M^{n+}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนัก} \end{aligned}$$

เมื่อ M^{n+} มีค่าน้อย ค่า E จะมีค่าไปในทางลบมากกว่า E^0 ทำให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเข้าไปอีก เพื่อยังทำให้ปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ และมีการเกาะของโลหะที่ขั้วไฟฟ้าต่อไปจนกว่าจะสมบูรณ์ แต่ในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะมีผลทำให้ไอออนตัวอื่นที่อยู่ในสารละลายสามารถเกิดปฏิกิริยาและเกาะที่ขั้วไฟฟ้าได้ด้วย หมายความว่า การแยกโลหะอาจทำได้ไม่บริสุทธิ์ ถ้าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์มีความเข้มข้นน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับไอออนอื่นๆที่มีอยู่ในสารละลาย

3. ผลของสารที่ทำให้เกิดคอมเพลกซ์ (Effect of complexing agent)

ในการแยกโลหะออกจากสารประกอบเชิงซ้อน ให้มาเกาะที่ขั้วต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าการแยกไอออนนั้นออกจากสารละลายเกลือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้จากค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนนั้น จากการที่ต้องใช้

ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจึงทำให้สามารถใช้ผลการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมาช่วยทำให้การแยกเกิดขึ้นได้สมบูรณ์

2.7 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และเวลาที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเคมีไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดสภาวะการแยกด้วยไฟฟ้า 2 แบบคือ แบบกระแสไฟฟ้าคงที่และศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยการควบคุมสภาวะของการทดลองทั้งสองแบบนี้ มีหลักการเดียวกันคือ โดยทั่วไปค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องมีค่ามากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากกัลวานิกที่คำนวณได้ตามทฤษฎีตั้งสมการ (2-7) เป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เซลล์เกิดปฏิกิริยาการแยกทางเคมีไฟฟ้า

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2-7)$$

โดย

$$E_{\text{cell}} = \text{ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์เคมีไฟฟ้า}$$

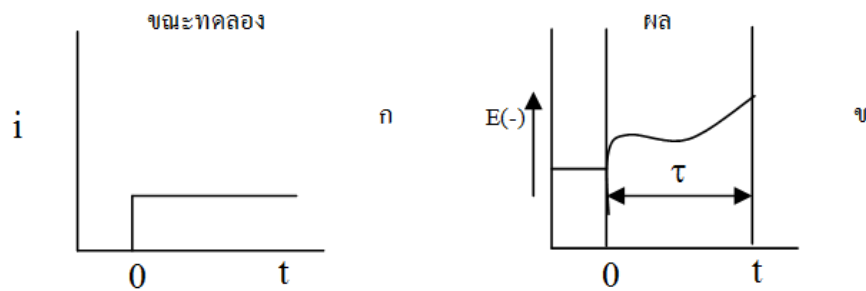
$$E_{\text{cathode}} = \text{ศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทด}$$

$$E_{\text{anode}} = \text{ศักย์ไฟฟ้าของขั้วแอโนด}$$

2.7.1 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่หรือไม่ควบคุมศักย์ไฟฟ้า

การทำการวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำเพาะหรือยุ่งยากเหมาะกับการวิเคราะห์โลหะในสารตัวอย่าง หรือการแยกโลหะบริสุทธิ์ออกจากสารตัวอย่าง

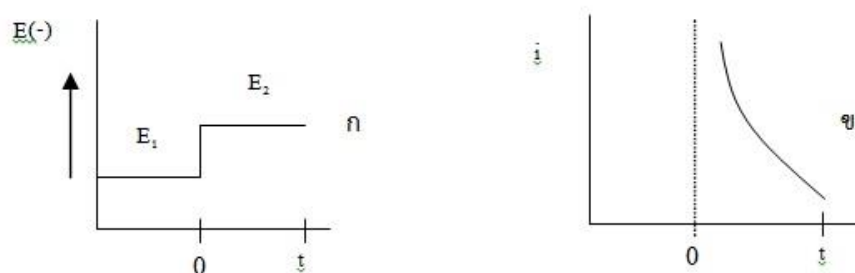
การควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าคงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลงด้วย โดย Transition time (τ) คือช่วงเวลาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งค่านี้มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962)

2.7.2 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่หรือแบบไม่ควบคุมกระแสไฟฟ้า

เทคนิคการควบคุมศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดให้คงที่ ขณะทำการวิเคราะห์ด้วยเคมีไฟฟ้าเป็นเรื่องที่ยุ้งยากกว่าวิธีแรกทีกล่าวมา ทั้งนี้เพราะเมื่อเวลาผ่านไป กระแสไฟฟ้าของเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงในทางลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันของความเข้มข้น โดยเมื่อเวลาผ่านไปที่บริเวณพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทดจะมีความเข้มข้นไอออนต่ำลง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในเซลล์ลดลงเนื่องจากต้องควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดก็จะเปลี่ยนแปลงมากทำให้ควบคุมลำบาก



รูปที่ 2.4 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962)

2.8 เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell)

เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางเคมีที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี หรือพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยวงจรไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด (Electrode) สองขั้วจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน เรียกว่าขั้วแอโนด (Anode) และอีกขั้วหนึ่งเรียกว่า ขั้วแคโทด (Cathode) ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน

2.8.1 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ของเซลล์ คือ เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก และเซลล์อิเล็กโทรไลต์

1. เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก

เป็นเซลล์เคมีไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า เกิดจากสารเคมีทำปฏิกิริยากันในเซลล์ แล้วเกิดกระแสไฟฟ้า เช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์อัลคาไลน์ เซลล์ปรอท เซลล์เงิน แบตเตอรี่ ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า โดยจะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก สำหรับการใส่เซลล์กัลวานิกในการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของการเกิดสมดุล (Equilibrium constant) ของปฏิกิริยาที่เซลล์

2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์

เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้าที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ ในด้านการวิเคราะห์เซลล์อิเล็กโทรไลต์ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ต้องการ โดยเทคนิควิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ เช่น โวลแทมเมตรี และอิเล็กโทรแกรวิเมตรี เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอะลูมิเนียม การแยกของโลหะเงินหรือทอง การชุบโลหะ เป็นต้น

2.8.2 ส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์กับสื่อไฟฟ้าภายนอก โดยเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ จะต้องประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าต่างกัน นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้ายังสามารถแบ่งได้ตามหน้าที่ภายในเซลล์เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode) มีหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับสื่อภายนอก แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงถูกต้องเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า เพื่อใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary Electrode) ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือ กระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้า ไรซินิม และแกรไฟต์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า

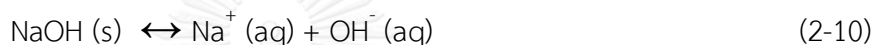
โดยแกรไฟต์เป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะทึบแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นจะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าน้อย

โดยคาร์บอนเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับทำขั้วไฟฟ้า ไม่ว่าจะในรูปแบบหรือผ้าทอโดยมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุนจากน้อยกว่า 2 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 50 นาโนเมตร

ในขณะที่เดียวกันคาร์บอนเป็นวัสดุที่เฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งนิยมทำเป็นขั้วไฟฟ้า หรือเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุชนิดอื่นๆ นอกจากนี้คาร์บอนยังมีราคาถูกและหาได้ง่ายในรูปแบบต่างๆ อีกด้วย ในสภาพของแข็งคาร์บอนทำให้อยู่ในรูปแท่งทรงกระบอกหรือเป็นแผ่นก็ได้ นอกจากนี้ยังทอเป็นแผ่นผ้าให้แก๊สแพร่ผ่านได้ ผงคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นประโยชน์ต่อการใช้รองรับสารเร่งปฏิกิริยาและทำให้ขั้วไฟฟ้ามีพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากโครงสร้างทำให้เกิดความพรุนได้เป็นชั้นๆ จึงมีการนำคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นสารสอดไส้หรือเป็นตัวกลางสำหรับการเก็บไฮโดรเจน

2. สารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

สารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ สารละลายที่สถานะเป็นของเหลวสามารถนำไฟฟ้าได้ เพราะมีไอออนบวกและไอออนลบเคลื่อนที่ไปมา สารอิเล็กโทรไลต์มี 2 ชนิด คือ สารประกอบไอออนิกหลอมเหลว โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการ (2-8) และ สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายกรด เบส และเกลือ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการ (2-9) - (2-11) ตามลำดับ

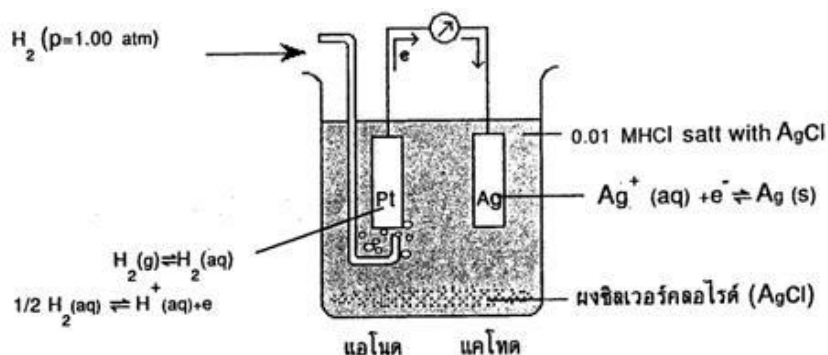


2.8.3 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้าต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้

1. การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย (Cell without liquid junction)

เมื่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์สามารถใช้ชนิดเดียวกันได้ การต่อเซลล์ก็ไม่จำเป็นต้องมีสะพานเชื่อม เซลล์ชนิดนี้เรียกว่า Cell without liquid junction ตัวอย่างเช่น แผ่นแพลทินัม (Pt) และแผ่นเงิน (Ag) อยู่ในสารละลาย 0.01 M HCl (กรดไฮโดรคลอริก) ที่อิ่มตัวด้วย AgCl (ซิลเวอร์คลอไรด์) โดยมีท่อผ่าน H_2 (แก๊สไฮโดรเจน) เข้ามาในสารละลายทางแผ่นแพลทินัมตลอดเวลา เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และแผ่นเงินทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

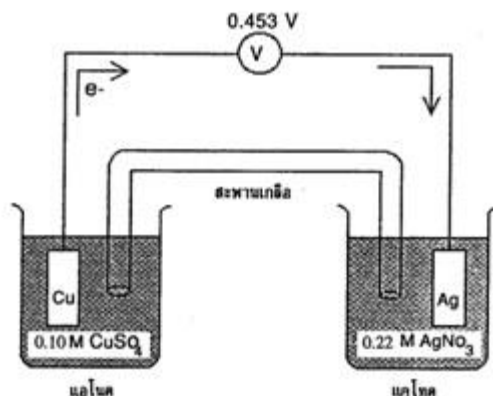
2. การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cell with liquid junction)

เมื่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่างชนิดกัน หรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดเดียวกันที่มีความเข้มข้นต่างกันถูกบรรจุในภาชนะที่แยกกัน สามารถทำให้สารละลายทั้งสองเชื่อมกันครบวงจรได้โดยใช้รอยต่อของสารละลาย เซลล์ที่สร้างในลักษณะนี้เรียกว่า Cell with liquid junction บ่อยครั้งที่เซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วยรอยต่อของเหลวหนึ่งรอยต่อหรือมากกว่า เซลล์มีรอยต่อของเหลวจะเกิดศักย์ไฟฟ้าจำนวนเล็กน้อยที่รอยต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์สองชนิดที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน ซึ่งเรียกศักย์ไฟฟ้าแบบนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้ารอยต่อ (Junction potential, E_j) รอยต่อของเหลวบางครั้งมีความสำคัญในการวัดเชิงเคมีไฟฟ้า เนื่องจากการเกิดศักย์ไฟฟ้ารอยต่อจำนวนเล็กน้อยระหว่างผิวหน้าสัมผัสกับการวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์โดยรวม

รอยต่อของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของครึ่งเซลล์ทั้งสองสามารถทำเป็นรูปแบบต่าง ๆ กันได้หลายแบบ

■ สะพานเกลือ

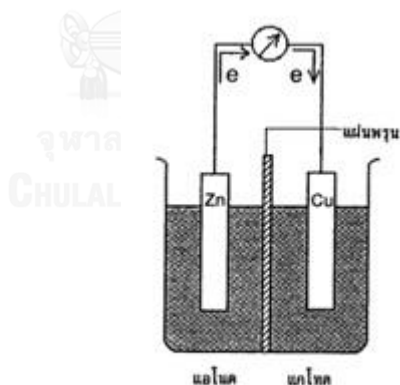
เตรียมโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น KCl, KNO_3 จะถูกบรรจุลงในหลอดแก้วรูปตัวยู (U) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ควรอิ่มตัว สารละลายจะอยู่ในหลอดแก้วรูปตัวยู โดยไม่ไหลออกมาได้ด้วยการใช้แผ่นแก้วพรุนปิดปลายหลอดแก้วไว้ หรือใช้วุ้น (agar) ที่อิ่มตัวด้วยอิเล็กโทรไลต์บรรจุในหลอดแก้ว การใช้สะพานเกลือเป็นตัวเชื่อมจะทำให้สามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าได้ จึงนิยมใช้กันมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เซลล์ชนิดมีรอยต่อของสารละลาย แบบต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ (เพ็ญศรี ทองนพเนือ, 2552)

- แผ่นแก้วที่เป็นรูพรุน

ใช้แผ่นแก้วที่เป็นรูพรุนกั้นกลางระหว่างสารละลายทั้งสองฝั่งเพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายทั้งสองฝั่งผสมกัน แต่แผ่นแก้วนั้นยอมให้อิออนเคลื่อนที่ผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

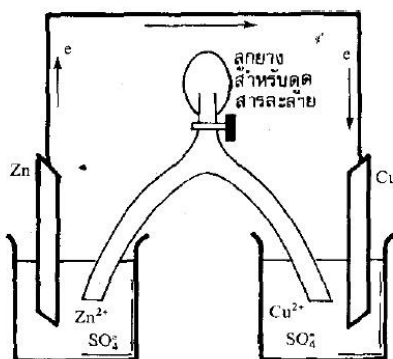


รูปที่ 2.7 เซลล์ชนิดมีรอยต่อของสารละลายโดยใช้แผ่นแก้วรูพรุนเป็นตัวกั้นกลางระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสอง (เพ็ญศรี ทองนพเนือ, 2552)

- สะพานของสารละลาย

โดยการใช้หลอดแก้วรูปตัววาย (Y) ให้ปลายสองข้างจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งสองที่แยกออกจากกัน แล้วใช้ลูกยางดูดสารละลายทางปลายอีกข้างหนึ่งให้สารละลายทั้งสองมา

พบกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 สะพานของสารละลายแบบนี้ ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลายได้มาก จึงไม่นิยมใช้ในการวิเคราะห์

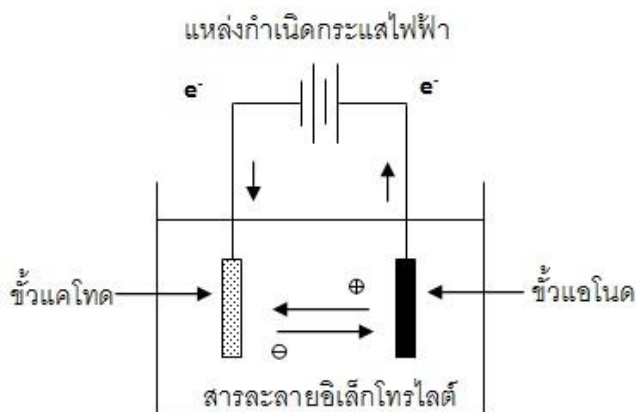


รูปที่ 2.8 เซลล์มีรอยต่อของสารละลายแบบใช้สะพานของสารละลาย (ธวัชชัย ศรีวิบูลย์, 2548)

2.9 หลักการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระบวนการเคมีไฟฟ้าหมายถึง กระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้า

แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอน ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน องค์ประกอบเกิดการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้างดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

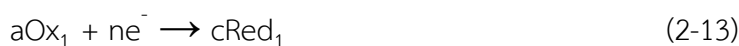
2.9.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคมีไฟฟ้า

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเกิดที่ขั้วเคมีไฟฟ้า โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์หรือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน จะมีสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน เรียกสารนี้ว่าเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) และอีกสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เรียกสารนี้ว่าเป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) หากแบ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ออกเป็นสองส่วน จะได้ครึ่งปฏิกิริยา (Half reaction) สองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน) ดังแสดงในสมการ (2-12) และปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) ดังแสดงในสมการ (2-13)

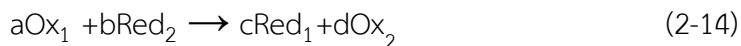
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน :



ปฏิกิริยารีดักชัน :



ถ้ารวมครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกันโดยคูณจำนวนอิเล็กตรอนที่ให้และรับเท่ากัน จะได้ปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังแสดงในสมการ (2-14)



ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดการแข่งขันในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายและโมเลกุลของน้ำ ในการพิจารณาจะแยกอธิบายการแข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังนี้

1. ปฏิกิริยาที่แคโทด

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดได้ 2 กรณี คือ

- ไอออนบวกกฤตริตวิซ์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น ไอออนโลหะกฤตริตวิซ์เป็นโลหะ
- โมเลกุลของน้ำอาจกฤตริตวิซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน

2. ปฏิกิริยาที่แอโนด

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดได้ 2 กรณี คือ

- ไอออนลบถูกออกซิไดซ์เป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น คลอไรด์ไอออนเป็นแก๊สคลอรีน
- โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดซ์ให้เป็นโมเลกุลของออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออน

ในการทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดและปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด หรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยาว่าคู่ใดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุด ปฏิกิริยาคู่หนึ่งจะเกิดขึ้นก่อนซึ่งมีความจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยา และหากทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวแล้วจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น

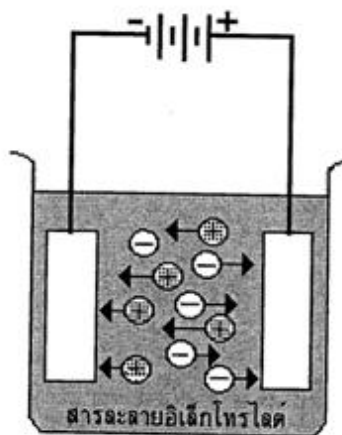
2.9.2 การนำพาไอออนในสารละลาย

ไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลาย ถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และคอนเวกชันหรือการพา

(Convection) กระบวนการนำพาไอออนทั้งสามกลไกนี้ เกิดขึ้นทั้งกับขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด สามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลาย หรืออาจถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ

1. ไมเกรชัน (Migration)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกเคลื่อนเข้าหาขั้วลบ และไอออนลบเคลื่อนไปทางขั้วบวก ดังในรูปที่ 2.10 ความเร็วของการที่ไอออนเคลื่อนที่เข้าหา หรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น เพิ่มหรือลดไปด้วย นอกจากนี้ ถ้ามีไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลายด้วย จะเกิดการแย่งกันเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรอันเนื่องมาจากไอออนที่ต้องการจะลดลงไปด้วย เช่น การที่สะพานเกลือเป็นสารละลายของ KCl ที่มีความเข้มข้นมากกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ 50-100 เท่า ทำให้ทั้ง K^+ และ Cl^- แย่งเคลื่อนเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าแทนไอออนของโลหะหนัก ทำให้ไอออนของโลหะหนักไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน แต่จะเกิดการเคลื่อนที่แบบการแพร่แทน เป็นต้น

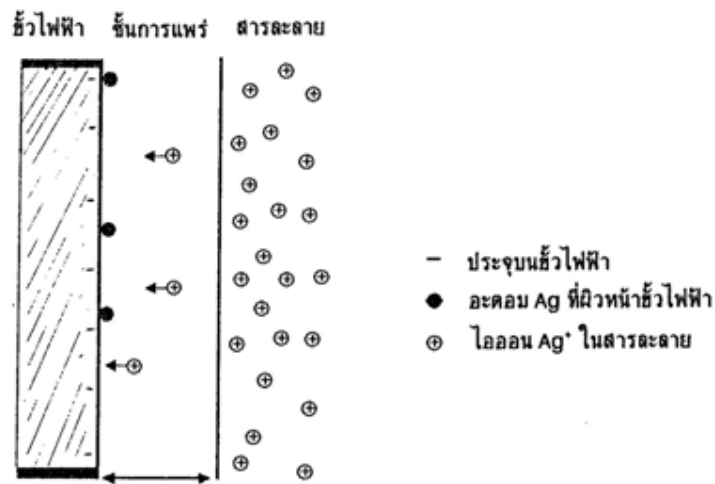


รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

2. การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออน หรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของไอออนสูงกว่า ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำกว่า จนกว่าไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นไอออนแล้ว อัตราเร็วของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นไอออนที่แตกต่างกัน เช่น ดังในรูปที่ 2.11 การพอกพูนของซิลเวอร์ที่ขั้วแคโทดในสารละลายที่ประกอบด้วย

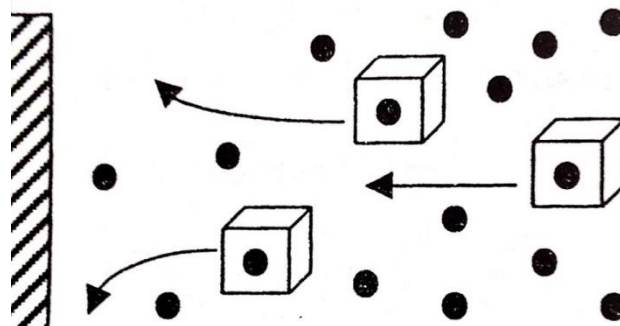
Ag^+ ในความเข้มข้นที่มากกว่าที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จึงเกิดการแพร่ของ Ag^+ ในสารละลาย และที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าต่างกันมาก การแพร่ก็ยิ่งเกิดอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.11 การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่ (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

3. คอนเวกชัน หรือการพา (Convection)

การที่ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหา หรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.12 อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลายหรือด้วยกลไกภายนอก เช่น โดยการคน หรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนภายในสารละลาย



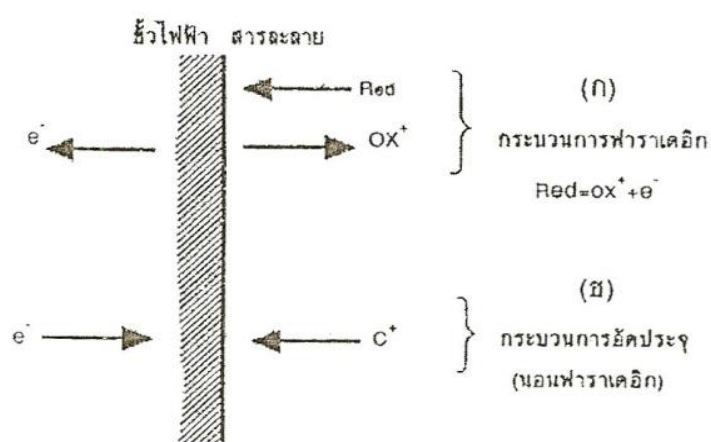
รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบการพา (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

กลไกการนำพาไอออนจากสารละลายเข้าหรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทั้งสามรูปแบบที่ได้กล่าวไปแล้วนี้ สามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลายหรือถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับเทคนิคของการวิเคราะห์นั้นๆ ดังได้ยกตัวอย่างในการกำหนดให้เกิดไมเกรชันของไอออนในสะพานเกลือ หรือการกวนสารละลายเพื่อให้เกิดคอนเวกชัน ช่วยให้การเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหากัน หรือออกจากขั้วไฟฟ้าได้เร็วขึ้น เป็นต้น

2.9.3 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

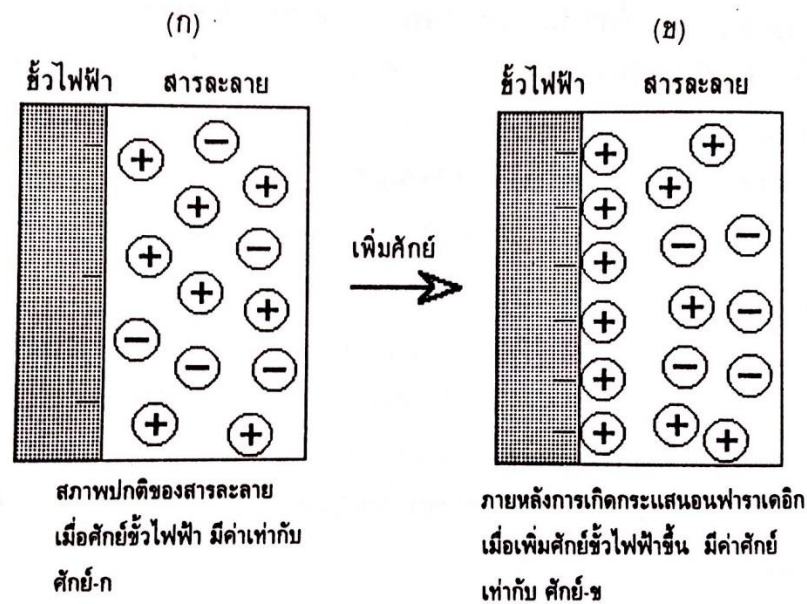
ถ้าไอออนหรือประจุที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและจ่ายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการดังกล่าวนี้ที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นได้ เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Non-faradaic process) กระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non-faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข)



รูปที่ 2.13 กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพลวัตหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

ในรูปที่ 2.14 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์ -ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายทั่วในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) สมมุติให้เท่ากับ -ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์ -ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ที่ โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้ง

หนึ่งกระแสไฟฟ้าก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสถานะที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการนอนฟาราเดอิก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสไฟฟ้าจากการอัดซึ่งเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การเปลี่ยนจากกระบวนการนอนฟาราเดอิกเป็นกระบวนการฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดยทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ และที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เดิมสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของ ศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิก ขึ้นได้ สารเคมีที่เดิมนี้เรียกว่า สารดีโพลาไรเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนี้ถูกเรียกว่า ขั้วดีโพลาไรซ์

2.9.4 โพลาริเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization)

เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายัง บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่งสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เกิดปฏิกิริยาแล้ว การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง กระแสไฟฟ้าไหลเข้าเซลล์ได้น้อยลง

โพลาริเซชันจากความเข้มข้นมีความสำคัญในกระบวนการเคมีไฟฟ้า บางวิธีต้องมีขั้นตอนบางอย่างเพื่อกำจัดผลของโพลาริเซชันจากความเข้มข้น แต่ในบางวิธีต้องทำให้เกิด ปัจจัยที่มีผลต่อโพลาริเซชันจากความเข้มข้น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำมี โอกาสเกิดโพลาริเซชันมาก ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นสูงมีโอกาสดังกล่าว การสั่นด้วยแรงกายภาพจากสารละลายที่มีการกวนอย่างดี และการที่พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น จะทำให้การเกิดโพลาริเซชันจะลดลง

2. โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization)

เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร อาจ เนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่

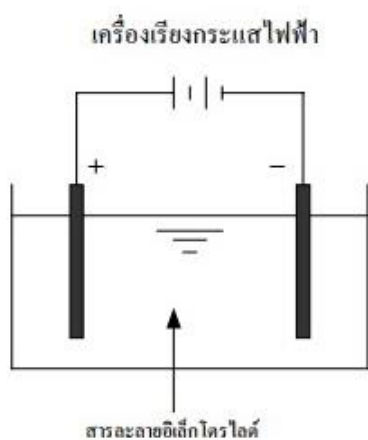
ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ปัจจัยที่มีผลต่อโพลาริเซชันแบบจลน์ ได้แก่ ผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออนจะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย จะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชัน และการลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันได้

2.10 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้า (Polprasert, 1996)

มี 4 แบบ ดังนี้

1. โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

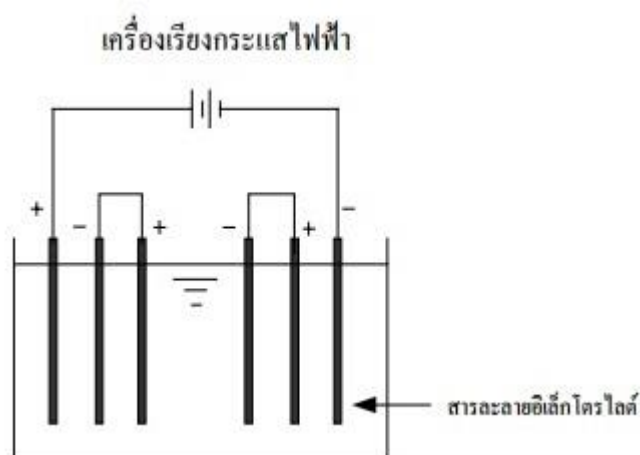
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีแผ่นขั้วไฟฟ้า 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นขั้วแอโนด และอีกขั้วหนึ่งเป็นขั้วแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pertorius และคณะ, 1991)

2. โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)

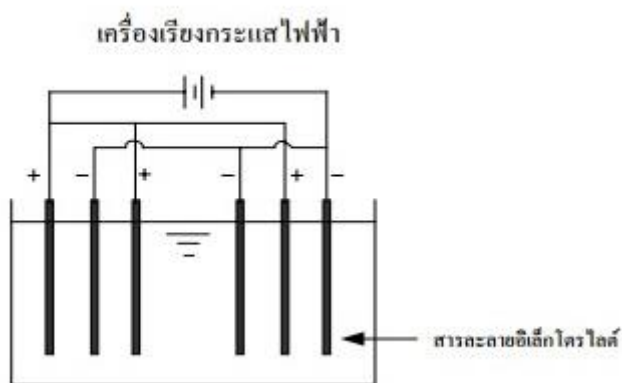
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆเซลล์มาต่อกัน โดยมีการเชื่อมจุดขั้วไฟฟ้าเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์แบบอนุกรม (Pertorius และคณะ, 1991)

3. โมนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน (Monopolar electrode in parallel)

กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.17

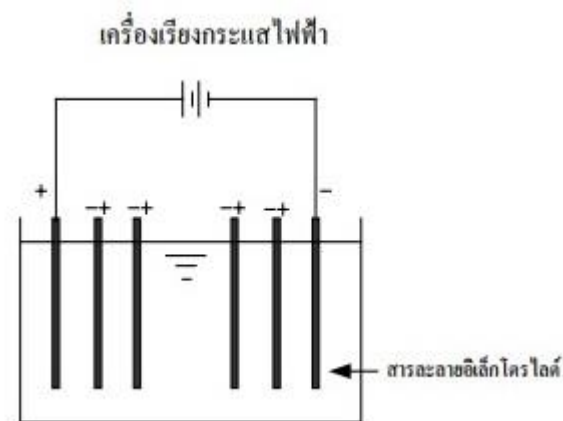


รูปที่ 2.17 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน (Pertorius และคณะ, 1991)

4. แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode with multiple in series)

มีจุดเชื่อมขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุด เฉพาะแผ่นขั้วไฟฟ้าที่ปลายนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวก ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นแผ่นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดย

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์สูงกว่า เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ต่อกันแบบอนุกรม แต่จะให้ไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด



รูปที่ 2.18 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโพลาร์ (Pertorius และคณะ, 1991)

2.11 กำลังไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้า (W) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้า (i) ที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา (t) มีหน่วยเป็น วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้า (E) มีหน่วยเป็น โวลต์ ดังสมการที่ (2-19) และ (2-20)

$$W = E_i \times t \quad (2-19)$$

$$W = E \times Q \quad (2-20)$$

กำลังไฟฟ้า (Watt, P) คำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา ดังสมการที่ (2-21)

$$P = \frac{W}{t} \quad (2-21)$$

2.12 ร้อยละการกำจัดโลหะหนัก (% Removal)

ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของระบบ นิยมวัดจากร้อยละการกำจัดโลหะหนัก คำนวณได้จากสมการที่ (2-23)

$$\% \text{ Removal} = \frac{W_i - W_t}{W_i} \times 100\% \quad (2-23)$$

W_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

W_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์ (2542) ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกนิกเกิลกลับคืนด้วยกระบวนการพอกพูนทางไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลองคือ สารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1 ลิตร ควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ ขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีพื้นที่ผิว 89 ตารางเซนติเมตร ขั้วไฟฟ้าแอโนด ทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ มีพื้นที่ผิว 82 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถนิกเกิลกลับมาได้ร้อยละ 60 ค่าประสิทธิภาพกระแสสูงสุดร้อยละ 32 โดยมีค่าพีเอชเริ่มต้นประมาณ 3.5 โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟูริก และหากปรับค่าพีเอชด้วยกรดบอริกจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ทำให้ประสิทธิภาพกระแสของระบบลดลง โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวจำพวกสารที่มีประจุลบ หากมีการปนเปื้อนเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพกระแสลดลงร้อยละ 70

มะลิ หุ่นสม (2544) ได้ทำการศึกษาการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนที่ 1 คือ การนำกลับของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่ 2 คือ การนำกลับของโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่ 3 คือ การนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะ

แต่ละชนิดมีสภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว สามารถนำกลับโลหะทองแดง ได้ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร นำกลับโลหะโครเมียม และนิกเกิล ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 6 มีผลต่อการนำกลับของทองแดง ในขณะที่โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 3 ไม่มีผล

หทัยทัต ซื่อสุวรรณ (2544) ได้ทำการศึกษาการแยกโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และโครเมียม ออกจากตะกอน ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักเท่ากับ 70, 95, 15 และ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ กระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ละลายโลหะหนักโรงบำบัดน้ำเสีย พบว่ามีปริมาณตะกอนแห้งประมาณร้อยละ 0.7 โดยมวลต่อปริมาตรกรดซัลฟูริก และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอนคือ 1.0 ขั้นตอนที่ 2 การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถแยกทองแดงมากกว่าร้อยละ 90 และจากนั้นโลหะชนิดอื่นๆ ที่เหลือในสารละลายจะถูกกำจัดออกมา โดยพบว่าสามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบร้อยละ 100 และกำจัดสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 80 ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110-130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 25 ถึง 30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร

Mansi- Al และ Monem- Abdel (2002) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลออกไซด์กลับคืนจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว นิกเกิลออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นตอนการกลายเป็นไอในการผลิตนิกเกิลซัลเฟต เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมซุบโลหะ และอุตสาหกรรมเซรามิก ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสม สามารถนำนิกเกิลออกไซด์กลับคืน ร้อยละ 99 ใช้ขนาดอนุภาคของแข็งของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 500 ไมครอน ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ร้อยละ 50 โดยมวล อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกรดซัลฟูริกเท่ากับ 1 ต่อ 12 โดยปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถนำนิกเกิลออกไซด์กลับคืนได้มากขึ้น แต่การแยกซัลเฟตออกจากกรดส่วนเกินนั้นทำได้ยาก อุณหภูมิในช่วง 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส เวลาในการย่อยสลายเท่ากับ 5 ชั่วโมง อัตราการกววนเท่ากับ 800 รอบต่อนาทีสามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ นอกจากการแยกนิกเกิลออกไซด์กลับคืนจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว ยังสามารถแยกอะลูมิเนียมกลับคืนได้อีกด้วย

Orhan และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลกลับคืนจากน้ำล้างของอ่างชุบโลหะด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้นเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลายเท่ากับ 3.25 ลิตร ใช้ถึงปฏิกิริยาทรงกลมแบบหมุน และควบคุม

การทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมสามารถนำนิกเกิลกลับคืนร้อยละ 90 ให้ค่าประสิทธิภาพกระแสร้อยละ 74 ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 325 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เส้นผ่าศูนย์กลางของขั้วแคโทดแบบทรงกลมเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ถ้านำนิกเกิลกลับคืนทั้งหมดร้อยละ 100 ค่าประสิทธิภาพกระแสลดลงร้อยละ 45 ในสภาวะการทดลองเหมือนกัน ค่าประสิทธิภาพกระแสลดลงเมื่อดำเนินการนำนิกเกิลกลับคืนอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งนิกเกิลมีความเข้มข้นน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นข้อจำกัดในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ควรหยุดทำการทดลองเนื่องจากจะไม่คุ้มค่าในการดำเนินการ ควรใช้เทคนิคอื่น เช่น เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

Subbaiah และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการตกตะกอนทางเคมีไฟฟ้าของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายทำจากพอลิโพรไพลีน ขั้วแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วแอโนด ทำจากโลหะไทเทเนียม สารละลายสังเคราะห์เตรียมจากนิกเกิลไนเตรทละลายในน้ำกลั่นและกรดไนตริก ปริมาตรสารละลายเท่ากับ 500 มิลลิลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.5 ความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลในช่วง 10 ถึง 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของนิกเกิลที่ลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าลดลง ไอออนไนเตรทที่อยู่ในสารละลายไม่มีผลต่อการตกตะกอนของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ขนาดอนุภาคของนิกเกิลไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าลดลง และตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์มีความจุ 200 มิลลิแอมแปร์ต่อกรัม

Paul Chen และ Lim (2005) ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรในการนำกลับโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยกระบวนการพอกพูนทางไฟฟ้า ถึงปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อขนาด 4 ลิตร ใช้โลหะสแตนเลสและแพลทินัมเคลือบด้วยไทเทเนียม เป็นขั้วแคโทดและแอโนดตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1.4 ด้วยกรดไนตริกร้อยละ 69.9 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 7.41 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หรือค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1 แอมแปร์ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 23 ถึง 25 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การนำกลับโลหะหนักได้ประมาณร้อยละ 90 ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดไม่มีผลในการนำกลับคืนโลหะหากมีระยะห่างน้อยกว่า 22 เซนติเมตร เนื่องจากค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ความเร็วในการกวนสารละลายเท่ากับ 800 รอบต่อนาที ถ้าความเร็วในการกวนมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากในสารละลายมีการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักสูง จะสามารถนำกลับโลหะหนักได้ดีกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ

Orinakova และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายคลอไรด์ และสารละลายซัลเฟต ที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนทางไฟฟ้าของ นิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG (Paraffin Impregnated Graphite) ควบคุมการทำงานแบบให้ศักย์ไฟฟ้า คงที่ ขั้วไฟฟ้าใช้งานทำจาก PIG ขั้วไฟฟ้าช่วยทำจากลวดแพลทินัม ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำจากเงิน กำหนดค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 2,3 และ 4 ตามลำดับ โดยการเติมกรดซัลฟูริก หรือกรดไฮโดร คลอริก พบว่า กลไกการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG แตกต่างกัน โดยสารละลายคลอไรด์จะเป็นกลไกของ Ni^{2+} รั่วอิเล็กตรอน เกิดเป็น $NiCl^+$ ขณะที่สารละลาย ซัลเฟตจะเป็นกลไกของ H^+ รั่วอิเล็กตรอน เกิดเป็น $NiOH^+$ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าไปตรวจสอบด้วย SEM (Scanning Electron Micrographs) พบว่า สารละลายคลอไรด์ ทำให้เกิดอนุภาคนิกเกิลเกาะติดแน่น สารละลายซัลเฟตทำให้มีอนุภาคนิกเกิลยึดเกาะต่ำ เชื่อได้ว่าคุณภาพการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG น่าจะมีผลมาจากชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน

ปทุมทิพย์ เสมอภาค และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลจากสารละลายเจือจางด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้นอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าแคโทดระหว่างผ้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วไฟฟ้าแอโนดทำจาก โลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ มีพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าเท่ากันคือ 66 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกนิกเกิลออกจากสารละลายเมื่อใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าฝั่งแคโทดเท่ากับ 15.2 แอมแปร์ต่อตาราง เมตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยสามารถแยกนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 93 ในเวลา 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 11.5 โดยให้ค่าการแยกสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ขั้ว แคโทดที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เป็น 1.3 เท่า เนื่องจากผ้าคาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับและ ถ่ายไอออนมวลสารได้ดีและสามารถดูดซับได้ที่มีความเข้มข้นต่ำ จึงดูดซับไอออนนิกเกิลไว้ที่ขั้วได้ดี ปฏิกริยารีดักชันเกิดได้ดีขึ้น

กิตติพงศ์ วิคุณประเสริฐ และ พรพรรณ ตูลาภรณ์ (2553) ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสม ในการนำนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือสารละลายนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นในช่วง 2000 ถึง 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้วแคโทดทำจากผ้าคาร์บอน มีพื้นที่ผิว 45 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนดทำจากโลหะ ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ มีพื้นที่ผิว 66 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่ เหมาะสมที่สุด สามารถนำนิกเกิลกลับคืนได้ร้อยละ 78 ในเวลา 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเชิง กระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 20.6 คือ ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

เท่ากับ 160 แอมแปร์ต่อตารางเมตร หรือค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.72 แอมแปร์ และเจือจางน้ำเสีย เป็น 5 เท่า หรือความเข้มข้นของนิเกิลประมาณ 475.58 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถนำนิเกิล กลับคืนได้ร้อยละ 78 ในเวลา 6 ชั่วโมง โดยให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 20.6

ศรัณยู ศรีธัญรัตน์ (2553) ได้ทำการศึกษาการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนทางไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งเป็น 2 ส่วนย่อย ส่วนที่ 1 คือ ศึกษาหาสภาวะเหมาะสมของการกำจัดนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ จัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิลเท่ากับ 976 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมกำจัดนิเกิลได้ร้อยละ 99.96 ได้แก่ ใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร ส่วนที่ 2 คือ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลโดยการจัดเซลล์แบบมีรอยต่อและไม่มีรอยต่อของสารละลายจากน้ำเสียจริง น้ำเสียจริงมีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิลเท่ากับ 1,281 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าเซลล์แบบมีรอยต่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลได้ดีกว่า สามารถกำจัดนิเกิลนาที่ที่ 90 ได้ร้อยละ 99.7

วรรณิตา จิระชัยพันธุ์ (2554) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน โดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลอง ออกเป็น 3 ส่วน การทดลองส่วนที่ 1 ตกตะกอนทางเคมีด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดซัลเฟตได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 4 โดยที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 1:1 สามารถกำจัดซัลเฟตได้ร้อยละ 85.7 การทดลองส่วนที่ 2 เปรียบเทียบถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกันสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนและวุ้นเกลืออิมิตัว ผลการทดลองพบว่า แผ่นแก้วพูนให้ผลการทดลองที่ดีและสะดวกต่อการใช้งานมากที่สุด โดยกำจัดสังกะสีได้ร้อยละ 97.9 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ณ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การทดลองส่วนที่ 3 กำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้แผ่นแก้วพูนเป็นรอยต่อ ผลการทดลองพบว่า กำจัดสังกะสีที่ร้อยละ 98.2 ณ เวลา 6 นาที

Hernandez-Tapia และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการแยกนิเกิลกลับคืนด้วยกระบวนการพอกพูนทางไฟฟ้า จากน้ำเสียขั้นตอนการล้างในกระบวนการชุบโลหะ น้ำเสียมีความเข้มข้นของนิเกิลในปริมาณที่เจือจาง 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลายเท่ากับ

600 มิลลิลิตร ควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ขั้วแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีพื้นที่ผิว 42 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนด ทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ มีพื้นที่ผิว 22 ตารางเซนติเมตร และควบคุมค่าพีเอชในช่วง 3.9 ถึง 4.3 ตลอดการทดลอง เพื่อให้ได้นิกเกิลที่มีความบริสุทธิ์สูง ผลการทดลองพบว่า สามารถแยกนิกเกิลกลับคืนได้ร้อยละ 94 ภายในระยะเวลา 60 นาที อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีผลกระทบต่อรูปพรรณสัณฐานของตะกอนนิกเกิล โดยความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 66.1 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตะกอนมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด

Robotin และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการแยกนิกเกิลกลับคืนด้วยกระบวนการพอกพูนทางไฟฟ้า จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียขยะอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมการทำงานแบบให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ขั้วไฟฟ้าใช้งานทำจากทองแดง ขั้วไฟฟ้าช่วยทำจากลวดแพลทินัม ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำจากเงิน กำหนดค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 2,3 และ 4 ตามลำดับ โดยการเติมกรดซัลฟูริก ความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลายเท่ากับ 2.4, 4.7, 8.8 และ 17.6 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพกระแสสูงสุดร้อยละ 95 คือ ค่าพีเอชในช่วง 3 ถึง 4 และความเข้มข้นนิกเกิลในช่วง 4.7 ถึง 17.6 กรัมต่อลิตร โดยค่าความเข้มข้นนิกเกิลต่ำที่ 2.4 และ 4.7 กรัมต่อลิตร พบตะกอนที่เนื้อเรียบสม่ำเสมอ ค่าความเข้มข้นนิกเกิลสูงที่ 8.8 กรัมต่อลิตร พบเส้นผ่านศูนย์กลางของตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น มีรอยแตกบนผิวตะกอนเล็กน้อย ค่าความเข้มข้นนิกเกิลสูงสุดที่ 17.6 กรัมต่อลิตร พบรอยแตกที่ผิวตะกอนมาก บ่งบอกถึงการถ่ายโอนประจุที่รวดเร็วในระหว่างการทดลอง

Xu และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อการสลายสารประกอบเชิงซ้อนและการแยกนิกเกิลกลับคืน ได้แก่ ความหนาแน่นกระแส ค่าพีเอช ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni-EDTA (Nickel-Ethylenediaminetetraacetic acid) โดยเปรียบเทียบกระบวนการใช้แสงร่วมกับไฟฟ้า กระบวนการใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และกระบวนการใช้แสงเพียงอย่างเดียว ควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ขั้วแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีพื้นที่ผิว 30 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนด ทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ มีพื้นที่ผิว 60 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด Ni-EDTA ได้ร้อยละ 75, 12 และ 5 ตามลำดับ และอัตราการแยกนิกเกิลกลับคืนได้ร้อยละ 45, 21 และ 5 ตามลำดับ การกำจัด Ni-EDTA และการแยกนิกเกิลกลับคืนสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแส และอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด โดยการสลายไอออนโลหะ

ของ Ni-EDTA เกิดขึ้นจากการแยกหมู่เอมีน และกรดแอสติก ออกจาก Ni-EDTA จากนั้นจะถูกย่อยสลายต่อไปอีกเป็นกรดโมเลกุลขนาดเล็กและไอออนอนินทรีย์

ตารางที่ 2.4 สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิลออกจากของเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

| หัวข้อ | ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์ | หทัยทัต ชื้อสุวรรณ | มะลิ หุ่นสม |
|--|----------------------------------|---|--|
| 1. ปีที่ศึกษา | พ.ศ. 2542 | พ.ศ. 2542 | พ.ศ. 2544 |
| 2. แหล่งที่มาของตัวอย่าง | น้ำเสียสังเคราะห์ | สลัดจ์โรงงานบำบัดน้ำเสีย | น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ |
| 3. องค์ประกอบโลหะหนักในตัวอย่าง | Ni ²⁺ | Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Cr ⁶⁺ | Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺ |
| 4. ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni ²⁺ | 1,000 mg/L | 95 mg/L | 1,000 mg/L |
| 6. รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า | ไม่มีรอยต่อ | มีรอยต่อ เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ | |
| 7. ควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า | กระแสไฟฟ้า | | ความต่างศักย์ไฟฟ้า |
| 8. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด | เหล็กกล้าไร้สนิม | | |
| 9. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด | ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ | | แพลทินัม |
| 10. ค่า พี เอช เริ่มต้นที่เหมาะสม | 3.3 | 1 | |
| 11. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับการกำจัดโลหะหนัก | ดีที่สุดที่ 140 A/m ² | ดีที่สุดที่ 110 A/m ² | ดีที่สุดที่ 126 A/m ² |
| 12. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด | - | น้ำเสีย | |
| 13. ร้อยละการกำจัด Ni ²⁺ | 89.95% | 100% | 99% |
| 14. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni ²⁺ | 8.15 ชั่วโมง | 4.5 ชั่วโมง | 4 ชั่วโมง |

ตารางที่ 2.4 สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิลออกจากของเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (ต่อ)

| หัวข้อ | Orhan และคณะ | Subbaiah และคณะ | กิตติพงษ์ วิคุณประเสริฐ และพรพรรณ ตูลาภรณ์ |
|--|----------------------------------|----------------------------------|--|
| 1. ปีที่ศึกษา | ค.ศ. 2002 | ค.ศ. 2002 | พ.ศ. 2553 |
| 2. แหล่งที่มาของตัวอย่าง | น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ | น้ำเสียสังเคราะห์ | น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ |
| 3. องค์ประกอบโลหะหนักในตัวอย่าง | Ni ²⁺ | Ni ²⁺ | Ni ²⁺ |
| 4. ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni ²⁺ | 2,000 mg/L | 10,000 ถึง 40,000 mg/L | 475.58 mg/L |
| 6. รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า | ทรงกระบอกแบบหมุน | มีรอยต่อพอลิโพรไพลีน | ไม่มีรอยต่อ |
| 7. ควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า | กระแสไฟฟ้า | | |
| 8. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด | โลหะแบบเม็ด | เหล็กกล้าไร้สนิม | ผ้าคาร์บอน |
| 9. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด | ไทเทเนียม | | |
| 10. ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม | 5.5 | 4.5 | 3 |
| 11. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับการกำจัดโลหะหนัก | ดีที่สุดที่ 325 A/m ² | ดีที่สุดที่ 200 A/m ² | ดีที่สุดที่ 130 A/m ² |
| 12. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด | - | น้ำเสีย | - |
| 13. ร้อยละการกำจัด Ni ²⁺ | 90% | 79% | 78% |
| 14. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni ²⁺ | 7 ชั่วโมง | - | 6 ชั่วโมง |

ตารางที่ 2.4 สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิลออกจากของเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (ต่อ)

| หัวข้อ | ศรัณญ์ ศิริธัญรัตน์ | Hernandez และ คณะ | Robotin และ คณะ |
|--|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. ปีที่ศึกษา | พ.ศ. 2553 | ค.ศ. 2013 | ค.ศ. 2013 |
| 2. แหล่งที่มาของตัวอย่าง | น้ำเสียห้องปฏิบัติการ | น้ำเสียโรงงาน ชุบโลหะ | น้ำเสีย สังเคราะห์ |
| 3. องค์ประกอบโลหะหนัก ในตัวอย่าง | Ni ²⁺ | Ni ²⁺ | Ni ²⁺ , Fe ²⁺ |
| 4. ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni ²⁺ | 1,281 mg/L | 100 และ 200 mg/L | 4,700 และ 8,800 mg/L |
| 6. รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า | มีรอยต่อ วุ้นเกลืออิมมิตัว | ทรงกระบอกแบบหมุน | ไม่มีรอยต่อ |
| 7. ควบคุมการทำงานของ กระบวนการเคมีไฟฟ้า | กระแสไฟฟ้า | | ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า |
| 8. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด | แกรไฟต์ | เหล็กกล้าไร้สนิม | ทองแดง |
| 9. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด | แกรไฟต์ | ไทเทเนียมเคลือบ รูทีเนียมออกไซด์ | แพลทินัม |
| 10. ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ เหมาะสม | 1 | 4 | 3 ถึง 4 |
| 11. ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าสำหรับการ กำจัดโลหะหนัก | ดีที่สุดที่ 140 A/m ² | ดีที่สุดที่ 66.1 A/m ² | ดีที่สุดที่ 200 A/m ² |
| 12. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้า แอโนด | NaCl 0.5 M | - | - |
| 13. ร้อยละการกำจัด Ni ²⁺ | 99.7% | 94% | 90% |
| 14. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni ²⁺ | 90 นาที | 1 ชั่วโมง | - |

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถังปฏิกริยาทำจากอะครีลิก ขนาด (กว้าง × ยาว × สูง) เท่ากับ $5 \times 11 \times 13$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) และขนาด (กว้าง × ยาว × สูง) เท่ากับ $5 \times 9 \times 13$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)

2. ขั้วไฟฟ้าแคโทดจำนวน 2 แผ่น มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร และขั้วไฟฟ้าแอโนดจำนวน 2 แผ่น มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่สัมผัสสารละลายต่อปริมาตรสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด (Area/Cell Volume Ratio, AV) เท่ากับ 85 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีแนวทางการออกแบบมาจากงานวิจัยการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (ศรัณยู ศรีธัญรัตน์, 2553)

3. ฐานรองขั้วไฟฟ้าฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดและขั้วไฟฟ้าแอโนด ทำจากอะครีลิก

4. แผ่นแก้วพรุนเบอร์ 4 เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 10 ไมโครเมตร

5. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply): GW, GPR-6060D

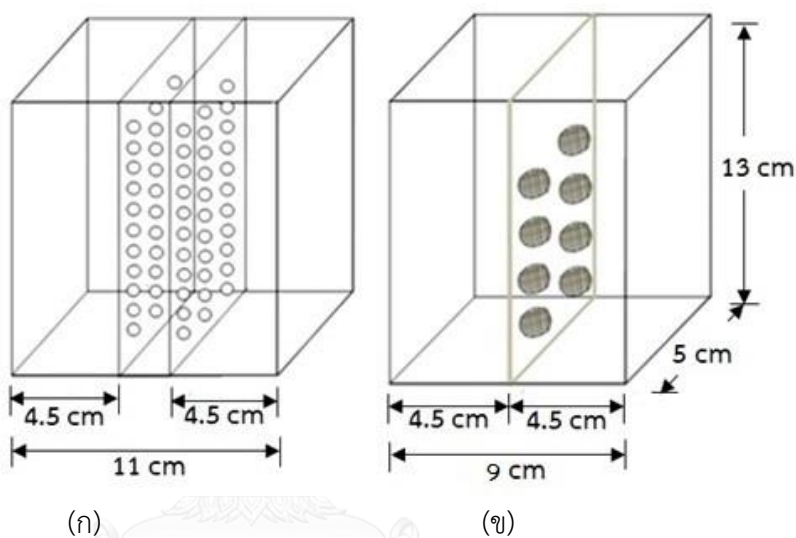
6. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer): Clifton, Cerastir

7. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter): Mettler Toledo, Seven Multi pH

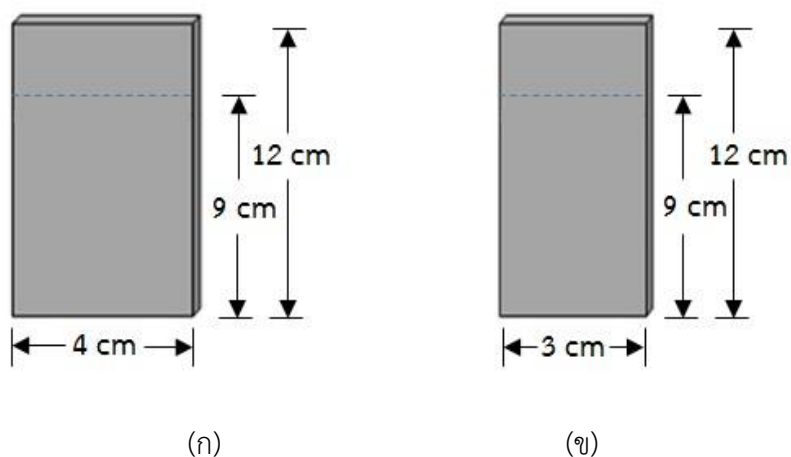
8. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digits Balance): Mettler-Toledo, Dragon 204

9. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS): GBC, Avanza

10. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography) : DIONEX LC 25
11. เครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ระเหย (High-performance liquid chromatography, HPLC): ALLTECH, 2000 ES
12. กระดาษกรองเบอร์ 2 (Filter paper): Whatman No. 2
13. เบ้ากรองที่ทำจากกรูพรุน (Sintered glass crucible): ROBU No.4
14. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป



รูปที่ 3.1 ถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลาย (ก) กั้นสารละลายด้วยผนังง้วน (ข) กั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุน



รูปที่ 3.2 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (ก) ขั้วไฟฟ้าฝั่งแคโทด (ข) ขั้วไฟฟ้าฝั่งแอนอด

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

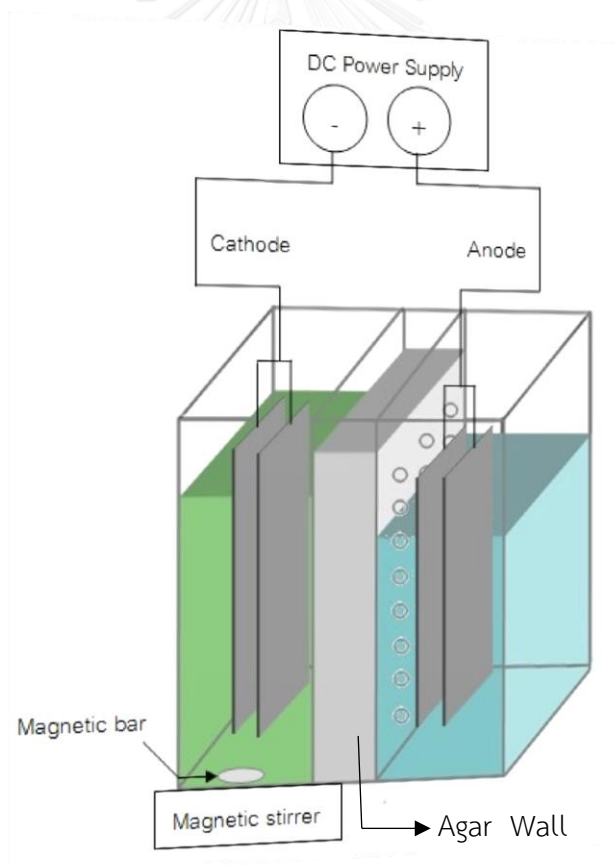
1. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)
2. ผงวุ้น (Agar powder)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
4. ไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, $\text{HC}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{N}_2$)
5. เอทานอล (Ethanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)
6. นิกเกิล (II) ซัลเฟต (Nickel (II) sulphate, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

3.1.3 การเตรียมน้ำเสียจริง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง และสะพานเกลือ

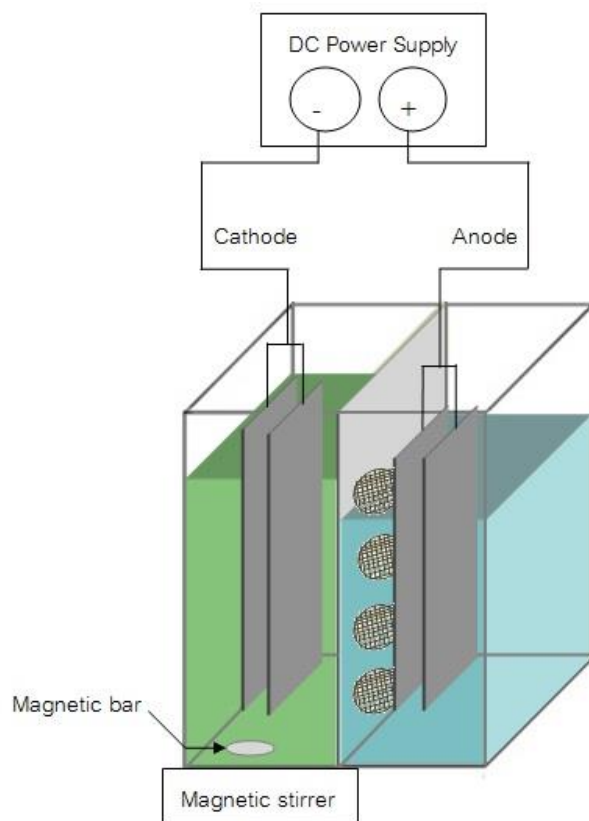
1. น้ำเสียจริง เป็นน้ำเสียจากวิชาปฏิบัติการสำหรับนิสิตปริญญาตรีในหัวข้อ “การหาปริมาณของนิกเกิลในลวดนิกโครมด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก” ในห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์
 - โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 29.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1,000 มิลลิลิตร
 - โซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว เตรียมจากการชั่ง NaCl 292.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1,000 มิลลิลิตร
3. การเตรียมสะพานเกลือชนิดผนังวุ้น
 - เตรียมสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์ จากการชั่ง NaCl 292.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1,000 มิลลิลิตร
 - นำสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด หลังจากนั้นนำมาผสมกับผงวุ้น 5 กรัม คนให้สารละลายเข้ากัน จนกระทั่งสารละลายข้นหนืด แล้วบรรจุลงในถังปฏิกิริยาตรงบริเวณที่ใส่ผนังวุ้น ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายภายในถังปฏิกิริยาแข็งเป็นวุ้น

3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองในถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลาย

1. เชื่อมรอยต่อของสารละลายในถังปฏิกิริยาด้วยผนังวุ้นที่เตรียมจากสารละลายอิมัลชันของโซเดียมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 หรือแผ่นแก้วพรุน ดังแสดงในรูปที่ 3.4
2. ในถังปฏิกิริยา เครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ส่วนเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดบรรจุน้ำเสียปริมาตร 170 มิลลิลิตร
3. ต่อขั้วบวกและขั้วลบเข้ากับขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ทำจากแผ่นแกรไฟต์ ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ทำจากแผ่นแกรไฟต์ ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ตามลำดับ
4. กวนผสมสารละลายฝั่งแคโทดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า กำหนดอัตราการกวนสารละลายคงที่ที่ 1,100 รอบต่อนาที



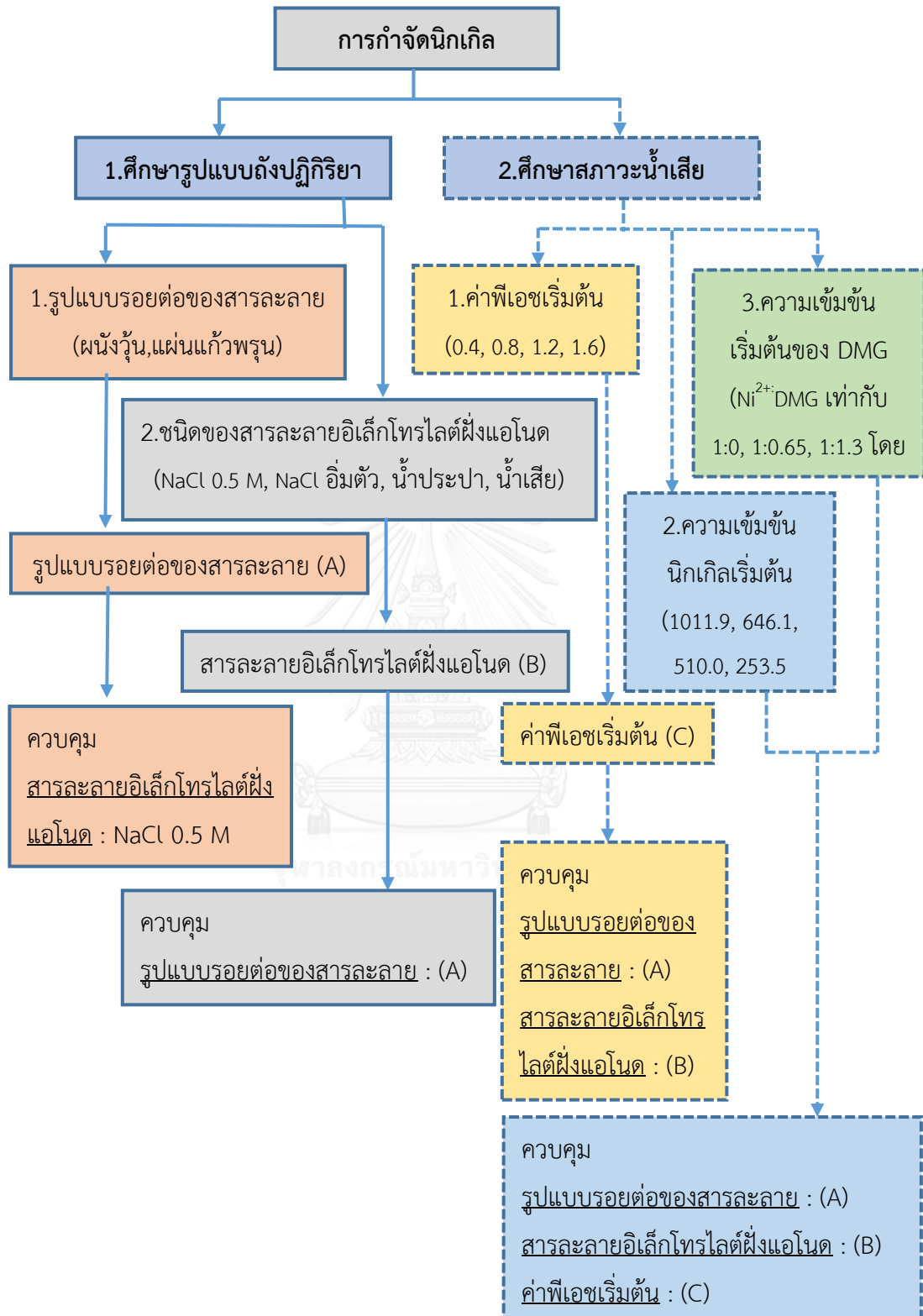
รูปที่ 3.3 ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยผนังวุ้น



รูปที่ 3.4 ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุน

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาแบบถังปฏิกิริยาที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี โดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ รูปแบบรอยต่อของสารละลาย และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนโนด โดยเลือกใช้รูปแบบถังปฏิกิริยา และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนโนดที่ดีที่สุดจากการทดลอง มาทำการทดสอบสำหรับการทดลองส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาสถานะน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิล ได้แก่ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล และความเข้มข้นเริ่มต้นของไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, DMG) ตามลำดับ เพื่อศึกษาความสามารถหรืออุปสรรคในการกำจัดนิกเกิล และทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการกำจัดนิกเกิล โดยมีผังแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผังการทำวิจัย

3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถังปฏิบัติการที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

การทดลองศึกษารูปแบบถังปฏิบัติการที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่รูปแบบรอยต่อของสารละลาย และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด

3.2.1.1 รูปแบบรอยต่อของสารละลาย

มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบรอยต่อของสารละลายที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีโดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยผนังวุ้นที่เตรียมจากสารละลายอิมัลชันของโซเดียมคลอไรด์หรือแผ่นแก้วพรุน ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ
2. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. บรรจุน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด พร้อมวัดค่าพีเอช
4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น
5. ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 แบบคือ 1) ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 3.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 แอมแปร์) ตลอดระยะเวลาการทดลอง สำหรับถังปฏิบัติการที่กั้นสารละลายด้วยผนังวุ้น และกั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุน โดยเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุดที่สามารถให้แก่ถังปฏิบัติการที่กั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุนได้ และ 2) ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.5 แอมแปร์) เป็นเวลา 20 นาที โดยเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุดที่สามารถให้แก่ถังปฏิบัติการที่กั้นสารละลายด้วยผนังวุ้นได้ หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1 แอมแปร์) เพื่อไม่ให้เกิดความร้อนสะสมในถังปฏิริยามากเกินไป สำหรับถังปฏิบัติการที่กั้นสารละลายด้วยผนังวุ้น โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการกวนผสมน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

7. เก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 และ 10 นาที ในระหว่างการกำจัดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พร้อมวัดค่าพีเอชในทุกๆจุดเก็บตัวอย่าง

8. นำตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บได้ในแต่ละระยะของการกำจัดมาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.1.1 การศึกษารูปแบบบรอยต่อของสารละลายที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

| | |
|--------------|--|
| ตัวแปรอิสระ | 1. รูปแบบบรอยต่อของสารละลาย เชื่อมต่อสารละลายด้วยผนังวุ้นที่เตรียมจากสารละลายอิมตัวของโซเดียมคลอไรด์หรือแผ่นแก้วรูพรุน |
| ตัวแปรควบคุม | 1. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด คือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ 2. อัตราการกวนสารละลายคงที่ที่ 1,100 รอบต่อนาที 3. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ 0.4 4. เวลาเก็บกัก 4 ชั่วโมง 5. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 6. ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง 170 มิลลิลิตร |
| ตัวแปรตาม | 1. ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสีย 2. ค่าพีเอช |

3.2.1.2 ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีโดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยรูปแบบบรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.1.1

2. เปลี่ยนชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด ปริมาตร 160 มิลลิลิตร เป็น โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โซเดียมคลอไรด์อิมตัว น้ำประปา และน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ตามลำดับ

3. บรรจุน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด พร้อมวัดค่าพีเอช

4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น

5. ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)

6. ทำการกวนผสมน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

7. เก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 และ 10 นาที ในระหว่างการกำจัด เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พร้อมวัดค่าพีเอชในทุกๆจุดเก็บตัวอย่าง นำตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือน้อยในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.1.2 การศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด ที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

| | |
|--------------|---|
| ตัวแปรอิสระ | 1. ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว น้ำประปา และน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี |
| ตัวแปรควบคุม | 1. ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 2. ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.1 3. อัตราการกวนสารละลายคงที่ที่ 1,100 รอบต่อนาที 4. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ 0.4 5. เวลาเก็บกัก 4 ชั่วโมง 6. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 7. ปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง 170 มิลลิลิตร |
| ตัวแปรตาม | 1. ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือน้ำเสีย 2. ค่าพีเอช |

3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสภาวะน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

การทดลองศึกษาสภาวะน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล และความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG

3.2.2.1 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีโดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยรูปแบบบรรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.1.1
2. บรรจุชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.2.1.2 ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. บรรจุน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่า 0.4
4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น
5. ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการกวนผสมน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. เก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 และ 10 นาทีจนครบเวลา 150 นาที พร้อมวัดค่าพีเอชในทุกๆจุดเก็บตัวอย่าง
8. นำตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
9. ทำการทดลองในข้อ 1-8 ซ้ำ โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้เป็น 0.8, 1.2 และ 1.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.2.1 การศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

| | |
|--------------|--|
| ตัวแปรอิสระ | 1. พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เท่ากับ 0.4, 0.8, 1.2 และ 1.6 |
| ตัวแปรควบคุม | <ol style="list-style-type: none"> ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.1 ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.2 อัตราการกวนสารละลายคงที่ที่ 1,100 รอบต่อนาที เวลาเก็บกัก 150 นาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง 170 มิลลิลิตร |
| ตัวแปรตาม | <ol style="list-style-type: none"> ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสีย ค่าพีเอช |

3.2.2.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี กำหนดความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น ที่ทำการศึกษานี้ เป็น 1000, 646.1, 500 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยคงองค์ประกอบอื่นๆในน้ำเสียให้ใกล้เคียงเดิมมากที่สุดโดยมีวิธีการทดลองดังนี้

- เชื่อมต่อครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยรูปแบบบรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.1
- บรรจุชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.2.1.2 ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
- บรรจุน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็นค่าที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.2.2.1 และปรับความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 1,000 mg/L และ โดยเติม $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.2694 กรัมลงในน้ำเสียจริงปริมาตร 170 มิลลิลิตร

4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น
5. ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการกวนผสมน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. เก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 และ 10 นาที เป็นเวลา 60 นาที พร้อมวัดค่าพีเอชในทุกๆจุดเก็บตัวอย่าง
8. นำตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
9. ทำการทดลองในข้อ 1-8 ซ้ำ โดยปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเป็น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยการนำน้ำเสียมา 131.56 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 170 มิลลิลิตร และปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.2.1 จากนั้นเติม NaCl 3.9231 กรัม เพื่อคงปริมาณ Cl^- ในน้ำเสีย ก่อนและหลังการเจือจางให้มีค่าใกล้เคียงกัน
10. ทำการทดลองในข้อ 1-8 ซ้ำ โดยปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเป็น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยการนำน้ำเสียมา 65.78 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 170 มิลลิลิตร และปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.2.1 จากนั้นเติม NaCl 9.1634 กรัม เพื่อคงปริมาณ Cl^- ในน้ำเสีย ก่อนและหลังการเจือจางให้มีค่าใกล้เคียงกัน
11. ทำการตรวจวัดปริมาณ Cl^- ในกรณีศึกษาความเข้มข้นนิกเกิลที่ถูกเจือจาง ด้วยวิธี Ion Chromatography ผลแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณคลอไรด์ไอออนก่อนและหลังที่มีการเติม NaCl ลงในน้ำเสียจริงที่ทำการเจือจางแล้ว

| ความเข้มข้นนิเกิล, mg/L | ปริมาณ Cl ⁻ ในน้ำเสีย (ก่อนเติม NaCl), mg/L | ปริมาณ Cl ⁻ หลังเติม NaCl, mg/L |
|----------------------------|---|---|
| 646.1 | 59,018 | - |
| 510.0 | 45,000 | 60,525 |
| 253.5 | 26,275 | 60,750 |

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.2.2 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิลที่มีผลต่อการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

| | |
|--------------|--|
| ตัวแปรอิสระ | 1. ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิล เท่ากับ 1000, 646.1, 500 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ตัวแปรควบคุม | <ol style="list-style-type: none"> ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.1 ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.2 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.2.1 อัตราการกวนสารละลายคงที่ที่ 1,100 รอบต่อนาที เวลาเก็บกัก 60 นาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง 170 มิลลิลิตร |
| ตัวแปรตาม | <ol style="list-style-type: none"> ความเข้มข้นของนิเกิลที่เหลือในน้ำเสีย ค่าพีเอช |

3.2.2.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG ที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีโดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยรูปแบบบรรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.1.1
2. บรรจุชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.2.1.2 ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. บรรจุน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็นค่าที่ดีที่สุด จากการทดลอง 3.2.2.1 ทั้งนี้จากการตรวจวัดปริมาณ DMG ในน้ำเสียด้วยวิธี Evaporative Light Scattering Detector ปรากฏว่าตรวจไม่พบ DMG ในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีนี้ ดังนั้นในสภาวะเริ่มต้นจะมีอัตราส่วนโมลนิกเกิลต่อ DMG เป็น 1:0
4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น
5. ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการกวนผสมน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. เก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 และ 10 นาที เป็นเวลา 60 นาที พร้อมวัดค่าพีเอชในทุกๆจุดเก็บตัวอย่าง
8. นำตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
9. ทำการทดลองในข้อ 1-8 ซ้ำ โดยปรับอัตราส่วนโมลนิกเกิลต่อ DMG เป็น 1:0.65 โดยชั่ง DMG มา 0.14 กรัม ละลายในเอทานอล 10 mL แล้วจึงผสมลงไป ในน้ำเสียที่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็นค่าที่ดีที่สุด จากการทดลอง 3.2.2.1 แล้ว ปริมาตร 160 mL ให้มีปริมาตรรวมทั้งสิ้นเป็น 170 mL
10. ทำการทดลองในข้อ 1-8 ซ้ำ โดยปรับอัตราส่วนโมลนิกเกิลต่อ DMG เป็น 1:1.3 โดยชั่ง DMG มา 0.28 กรัม ละลายในเอทานอล 10 mL แล้วจึงผสมลงไป ในน้ำเสียที่ปรับ

ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็นค่าที่ดีที่สุด จากการทดลอง 3.2.2.1 แล้ว ปริมาตร 160 mL ให้มี ปริมาตรรวมทั้งสิ้นเป็น 170 mL

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3.2.2.3 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG ที่มีผล ต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

| | |
|--------------|---|
| ตัวแปรอิสระ | 1. อัตราส่วนโมลนิกเกิลต่อ DMG เท่ากับ 1:0, 1:0.65 และ 1:1.3 |
| ตัวแปรควบคุม | <ol style="list-style-type: none"> ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตาราง เมตร ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.1 ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.1.2 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 3.2.2.1 อัตราการกวนสารละลายคงที่ที่ 1,100 รอบต่อนาที เวลาเก็บกัก 60 นาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง 170 มิลลิลิตร |
| ตัวแปรตาม | <ol style="list-style-type: none"> ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสีย ค่าพีเอช |

3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

ตารางที่ 3.7 แสดงวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของงานวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของนิกเกิล ความเข้มข้นของคลอไรด์ และความเข้มข้นของ DMG

ตารางที่ 3.7 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

| พารามิเตอร์ | วิธีการตรวจวัดค่า |
|-----------------------|--|
| ค่าพีเอช | Electrometric Method (ASTM E70-07) |
| ความเข้มข้นของนิกเกิล | Direct Aspiration Atomic Absorption Spectroscopy (ASTM D1886 – 14) |
| ความเข้มข้นของคลอไรด์ | Ion Chromatography (ASTM D512 – 12) |
| ความเข้มข้นของ DMG | Evaporative Light Scattering Detector Temperature : 60 °C Mobile phase : A : Water (0.1% Formic acid) B : Acetonitril (0.1% Formic acid) Flow rate : 0.6 mL/min (Hogg, 2011) |

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียจริงจากน้ำเสียของห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายพร้อมประเมนความสามารถและค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดนิเกิล การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี 2) ศึกษาสถานะน้ำเสียที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียที่รวบรวมมาจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้แก่ พีเอช ปริมาณนิเกิล ปริมาณคลอไรด์ และปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่อยู่ในสารอินทรีย์ (TOC) น้ำเสียมีลักษณะเป็นของเหลวใสสีเขียวอ่อน องค์ประกอบน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

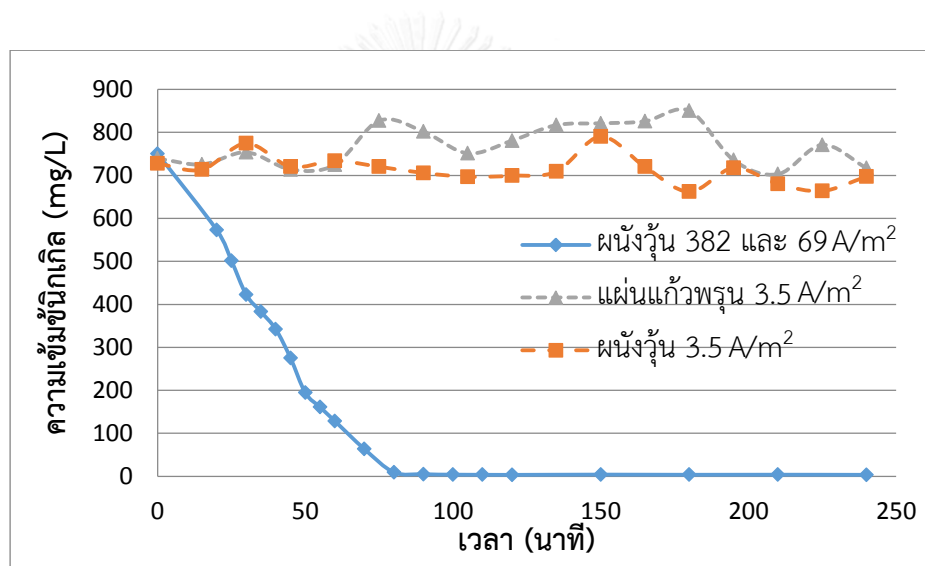
| พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด | ความเข้มข้น | หน่วย |
|---|-------------|-------|
| 1. ค่าพีเอช | 0.4 | - |
| 2. นิเกิล (Ni^{2+}) | 750 | mg/L |
| 3. คลอไรด์ (Cl^-) | 59,018 | mg/L |
| 4. ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่อยู่ในสารอินทรีย์ (TOC) | 11,145 | mg/L |

4.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

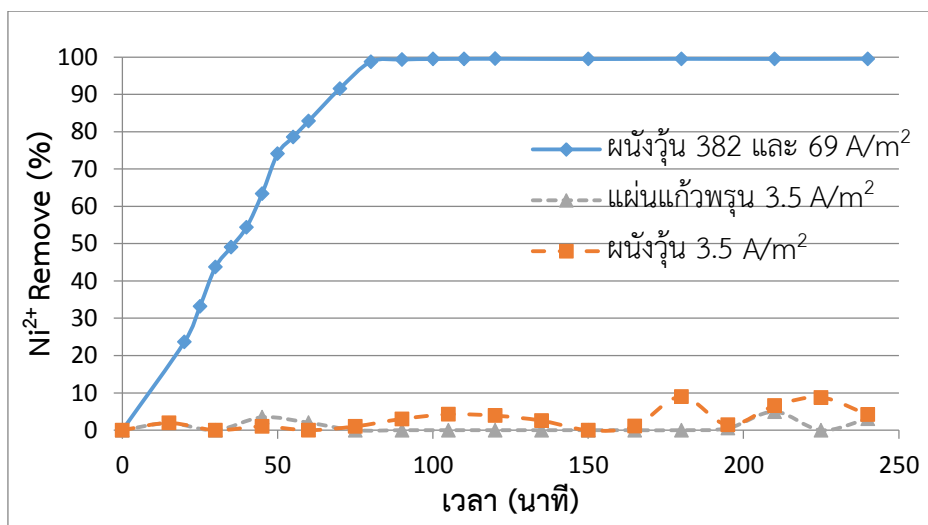
ศึกษาตัวแปรตามลำดับดังนี้ รูปแบบรอยต่อของสารละลาย และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด

4.1.1 รูปแบบรอยต่อของสารละลาย

การทดลองนี้ศึกษาผลของรูปแบบการกั้นสารละลายฝั่งแคโทด ซึ่งบรรจุน้ำเสียจริง และสารละลายฝั่งแอโนด ซึ่งบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริง ในถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยเปรียบเทียบการกั้นสารละลาย 2 แบบ คือ 1) กั้นสารละลายทั้ง 2 ฝั่งด้วยผนังวุ้น (Agar Wall) ที่เตรียมจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว และ 2) กั้นสารละลายทั้ง 2 ฝั่งด้วยแผ่นแก้วพรุน ที่มีขนาดรูพรุน 10 ไมโครเมตร ทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายและนำเสนอผลการทดลองไว้ในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ในถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อที่ใช้รูปแบบรอยต่อของสารละลายที่ต่างกัน



รูปที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริงเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ในถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อที่ใช้รูปแบบรอยต่อของสารละลายที่ต่างกัน

เมื่อพิจารณารูปแบบรอยต่อที่กั้นสารละลายด้วยผนังรู้นโซเดียมคลอไรด์อิมตัวและแผ่นแก้วพรุน ณ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เท่ากันพบว่า ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้ในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบ เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 3.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จึงมีการพิจารณาปรับใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น และพบว่า ไม่สามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาที่มีการกั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุนได้เกิน 3.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้งนี้คาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจาก วิธีการปล่อยให้อิออนเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนโดยอิสระ ทำให้ค่าความต้านทานของถังปฏิกิริยาแบบนี้มีค่าสูง ส่งผลให้ค่ากระแสที่สามารถไหลผ่านได้มีค่าน้อย ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ตามกฎของโอห์ม สมการที่ 4-1 โดยที่ E แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (E) ที่เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจ่ายได้ หากความต้านทานของเซลล์เคมีไฟฟ้า (R) มีค่ามาก ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่สามารถไหลผ่านวงจรได้จะมีค่าน้อยลง

$$E = IR \quad (4-1)$$

เมื่อ E คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

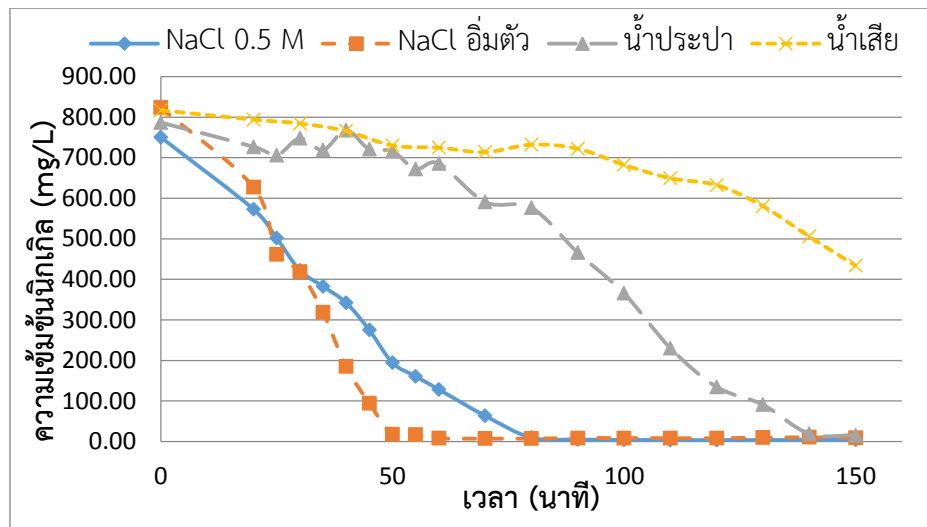
R คือ ความต้านทานของเซลล์เคมีไฟฟ้า (โอห์ม)

และสำหรับถังปฏิกริยาที่มีการกั้นสารละลายด้วยผนังงู้นโซเดียมคลอไรด์อิมตัว สามารถรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และเมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าปริมาณดังกล่าว พบว่า นิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้อย่างรวดเร็วมาก ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นในถังปฏิกริยา เป็นเหตุให้ผนังงู้นละลายแล้วเกิดการผสมของสารละลายทั้ง 2 ผัง ณ เวลาประมาณ 30 นาทีนับจากที่เริ่มทำการทดลอง ดังนั้นจึงทำการปรับวิธีการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใหม่ โดยทำการให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร แก่ระบบเพียงแค่ 20 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสลงมาให้คงที่ที่ 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตรจนสิ้นสุดการทดลอง จากผลการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า การให้ค่าความหนาแน่นแบบนี้ สามารถกำจัดนิกเกิลได้ถึง 99% ภายในเวลา 80 นาที

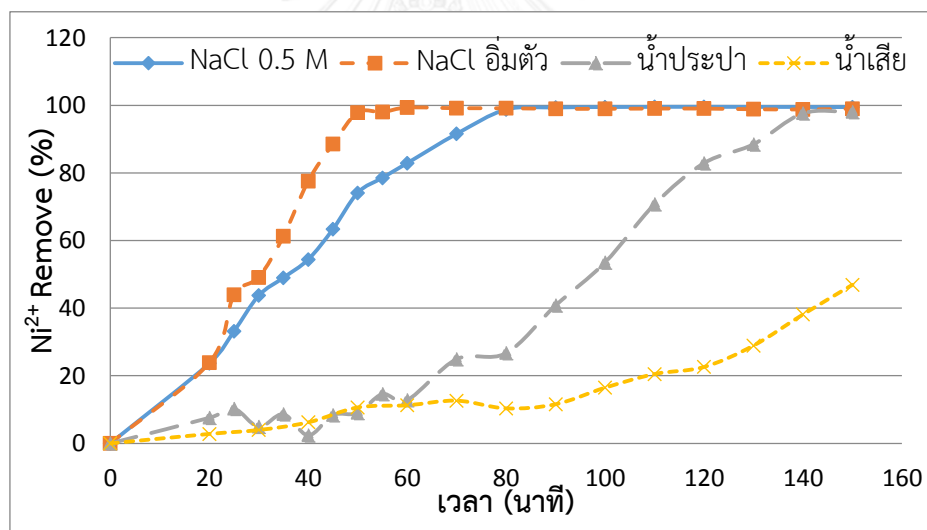
จากผลการทดลองข้างต้น จึงสรุปได้ว่า 1) ถังปฏิกริยาแบบกั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุนมีค่าความต้านทานค่อนข้างสูง ทำให้ไม่สามารถผ่านค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในระบบได้มาก การกำจัดนิกเกิลจึงเกิดขึ้นได้ไม่ดี 2) ถังปฏิกริยาแบบกั้นสารละลายด้วยผนังงู้นโซเดียมคลอไรด์อิมตัวเหมาะสำหรับใช้ในการศึกษาการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียมากกว่า เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่พอเหมาะ ดังนั้นจึงเลือกใช้ถังปฏิกริยาแบบกั้นสารละลายด้วยผนังงู้นสำหรับการทดลองในขั้นต่อไป

4.1.2 ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด

ศึกษาผลของชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดที่มีต่อความเร็วการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสีย ในถังปฏิกริยาแบบกั้นสารละลายด้วยผนังงู้นที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์อิมตัว ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทำการเปรียบเทียบผลของชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โซเดียมคลอไรด์อิมตัว น้ำประปา และน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ผลการทดลองถูกนำเสนอไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเสียนจริงเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนดต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียนจริงเทียบกับเวลาเมื่อทำการกำจัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนดต่างชนิดกัน

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสียนตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ ที่ใช้ในการบำบัด และร้อยละของนิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียน ณ เวลาต่างๆ เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนดต่างชนิดกัน จากผลการทดลอง พบว่า นิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียนได้อย่างรวดเร็ว และมากถึง 99% ภายในเวลา 50, 80, และ 140 นาที เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนดเป็นโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และ น้ำประปา

ตามลำดับ และไม่สามารถกำจัดนิเกิลได้มากกว่า 47 % ในเวลา 150 นาที เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นน้ำเสียจริง โดยผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้จากปริมาณที่แตกต่างกันของตัวรีดิวซ์ที่ดี และสถานะน้ำเสียที่ต่างกัน ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายฝังแอนโอดได้ถูกนำเสนอไว้ในปฏิกิริยาที่ 4-2 ถึง 4-5

| ปฏิกิริยาฝังขั้วไฟฟ้าแอนโอด | E^0 (Volt) | |
|--|--------------|-------|
| $2H_2O + O_2 \leftrightarrow O_3 + H^+ + 2e^-$ | -2.070 | (4-2) |
| $2H_2O \leftrightarrow H_2O_2 + 2H^+ + 2e^-$ | -1.770 | (4-3) |
| $2Cl^- \leftrightarrow Cl_2 + 2e^-$ | -1.360 | (4-4) |
| $2H_2O \leftrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ | -1.230 | (4-5) |

โดยสมการที่ (4-2) ถึง (4-5) แสดงชนิดของสารหรือโมเลกุลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) พร้อมค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0) ที่ระบุแนวโน้มความยากหรือง่ายในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารหรือโมเลกุลแต่ละชนิด ทั้งนี้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่มีค่าน้อยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 4 ชนิดมีน้ำ (H_2O) เป็นตัวทำละลายเหมือนกัน ทั้งนี้เนื่องจากตัวรีดิวซ์ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย อิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จึงถูกส่งต่อไปยังขั้วไฟฟ้าฝังแคโทดเพื่อใช้ในการรีดิวซ์นิเกิลหรือตัวออกซิไดส์อื่นๆ ได้ง่าย ดังนั้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังแอนโอดที่มีตัวรีดิวซ์ที่ดีอยู่ในปริมาณที่มาก และอยู่ในสารละลายที่มีสภาวะเหมาะสม ย่อมส่งเสริมให้เกิดการกำจัดนิเกิลในฝังแคโทดได้ดีและรวดเร็ว สอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ที่พบว่า นิเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้รวดเร็วที่สุดเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังแอนโอดเป็นโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว รองลงมาเป็นโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ส่วนการใช้น้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากน้ำประปามีตัวรีดิวซ์รวมกันเพียง 0.01 โมลาร์ (มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค, 2558) ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้กำจัดนิเกิลได้ไม่ดี และสำหรับการใช้น้ำเสียจริงเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าไม่สามารถกำจัดนิเกิลได้ดีกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่น ทั้งนี้คาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่น้ำเสียจริงมีค่าพีเอชค่อนข้างต่ำ นั่นคือความเข้มข้นของโปรตรอน (H^+) ในน้ำเสียมีค่าสูง เป็นผลให้การดำเนินไปของปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายฝังแอนโอดเกิดได้ค่อนข้างช้า การจ่ายอิเล็กตรอนเพื่อไปกำจัดนิเกิลในฝังแคโทดจึงเกิดขึ้นได้ไม่ค่อยดี

และเมื่อมาพิจารณาถึงร้อยละการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่สูงที่สุด เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน พบว่า นิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้มากที่สุดที่ 99.6%, 99.1%, 98.0%, และ 46.9% เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดเป็นโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว น้ำประปา และน้ำเสียจริง ตามลำดับ และเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้ได้มากที่สุด จึงเลือกใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดสำหรับการทดลองในขั้นต่อไป

4.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาสถานะน้ำเสียที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

ศึกษาตัวแปรตามลำดับดังนี้ ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, DMG)

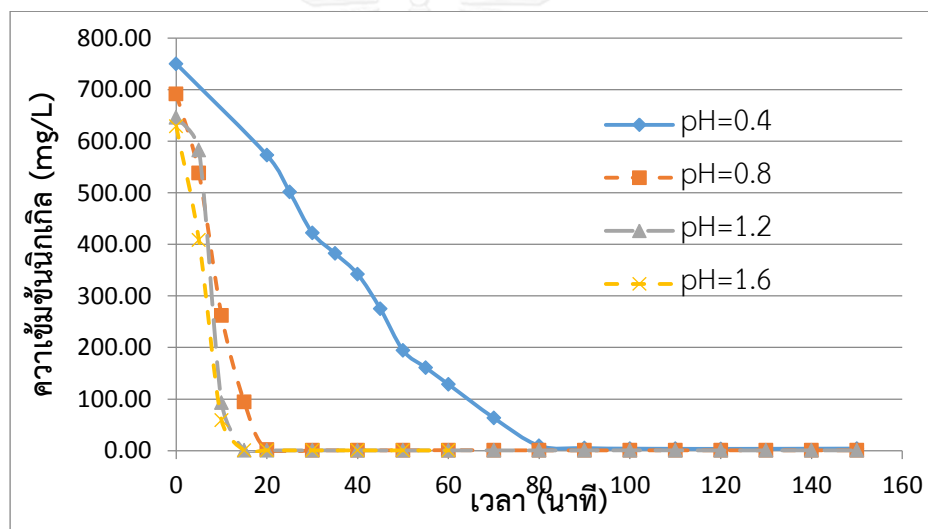
4.2.1 ค่าพีเอชเริ่มต้น

ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียจริงที่มีต่อการกำจัดนิกเกิล โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบกึ่งสารละลายด้วยผนังวุ้นโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดเป็นโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ น้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 0.4 และทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์จนค่าพีเอชของน้ำเสียมีค่าเป็น 0.8, 1.2 และ 1.6 ตามลำดับ ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตลอดการทดลอง ทำการตรวจวัดความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ณ เวลาต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลในน้ำเสียมีค่า 750, 692, 646 และ 627 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.5) ที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 0.4, 0.8, 1.2 และ 1.6 ตามลำดับ

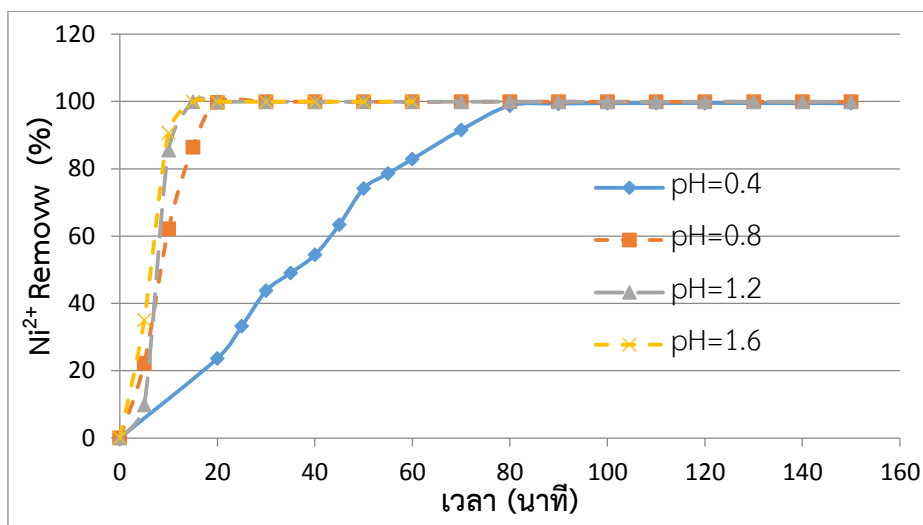
จากผลการทดลองพบว่า อัตราการกำจัดนิกเกิลเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายถูกปรับให้มากขึ้น โดยรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่า 99% นิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้ภายในเวลา 80, 20, 15 และ 15 นาที เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่า 0.4, 0.8, 1.2 และ 1.6 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 4-6 ถึง 4-9 เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้สูงขึ้น ปริมาณ H^+ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ 4-6 จะลดลงพลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบจึงถูกใช้ไปกับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลและน้ำในปฏิกิริยาที่ 4-7 และ 4-8 ได้มากขึ้น และส่งผลให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเกิด

ผลิตภัณฑ์ OH^- มากขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 4-8 จะส่งผลให้เกิดตะกอนสีเขียวของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ตามปฏิกิริยาที่ 4-9 ได้ดีขึ้น จากทั้งปฏิกิริยาที่ 4-7 และ 4-9 นี้ส่งผลร่วมกันให้นิกเกิลถูกกำจัดออกจากสารละลายได้รวดเร็วขึ้น

| ปฏิกิริยาฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด | E^0 (Volt) | |
|---|--------------|-------|
| $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$ | +0.000 | (4-6) |
| $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni}$ | -0.250 | (4-7) |
| $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ | -0.830 | (4-8) |
| $\text{Ni}^{2+} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2$ | - | (4-9) |



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าต่างๆกัน



รูปที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าต่างๆกัน

นอกจากนี้ผลการทดลองข้างต้นยังแสดงให้เห็นว่า อัตราการกำจัดนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นได้น้อยมากเมื่อค่าพีเอชของน้ำเสียมีค่ามากกว่า 1.2 โดย ณ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ 1.2 และ 1.6 (รูปที่ 4.6) 99% นิกเกิลถูกกำจัดได้ภายในเวลาเท่ากัน ที่ 15 นาที ดังนั้นการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีผลต่ออัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 1.2 เป็นค่า pH ต่ำสุดที่สามารถกำจัดนิกเกิลได้เร็วที่สุด จึงนับเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการกำจัดนิกเกิลในขั้นต่อไป

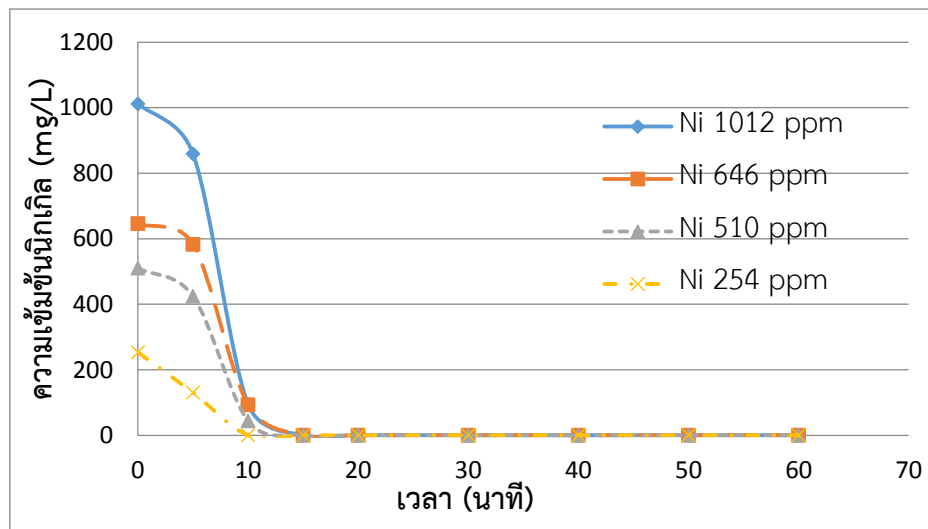
และเมื่อพิจารณาถึงเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดให้มีปริมาณนิกเกิลในน้ำทิ้งได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้ว พบว่า การกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ณ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ 0.4 ไม่สามารถทำให้ปริมาณนิกเกิลในน้ำลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ได้ภายในระยะเวลาการกำจัด 2.5 ชั่วโมง แต่การปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 0.8 และ 1.2 สามารถช่วยให้การกำจัดนิกเกิลเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น โดยปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียลดลงจนมีค่าผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งภายในเวลา 30 และ 15 นาที ตามลำดับ ดังข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงระยะเวลาการกำจัดนิเกิลและปริมาณนิเกิลที่เหลืออยู่ ณ เวลาที่นิเกิลมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 0.8, 1.2 และ 1.6

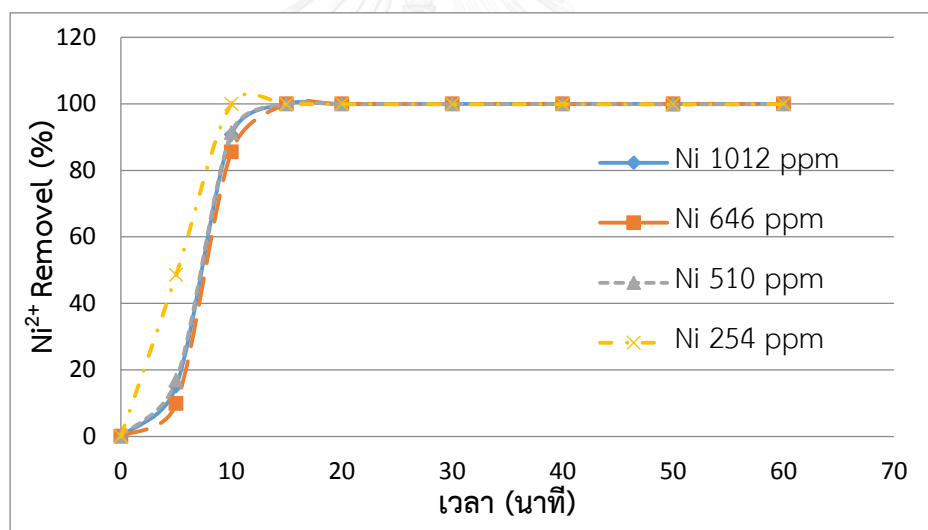
| ค่าพีเอชเริ่มต้น | เวลาในการกำจัดจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาท) | ค่าความเข้มข้นนิเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลาย (mg/L) | ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง |
|------------------|---|---|--------------------|
| pH = 0.8 | 30 | 0.7 | ผ่าน |
| pH = 1.2 | 15 | 0.6 | ผ่าน |
| pH = 1.6 | 15 | 0.6 | ผ่าน |

4.2.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิล

ทำการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นที่มีต่อการกำจัดนิเกิลในน้ำเสีย โดยปรับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิลจากเดิม 646 mg/L (ที่ pH 1.2) เป็น 1012, 510 และ 254 mg/L ทั้งนี้ได้มีการควบคุมปริมาณคลอไรด์ไอออนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำเสียจริงให้มีค่าคงที่ที่ประมาณ 60,000 mg/L ในทุกสารละลาย การทดลองดังกล่าวทำในถังปฏิกรณ์แบบกวนสารละลายด้วยผนังรุ่นที่เตรียมด้วยโซเดียมคลอไรด์อิมตัว ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอดโนดเป็นโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในทุกสารละลายเป็น 1.2 ผลการทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.8 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อค่าความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นแตกต่างกัน

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงค่าความเข้มข้นและร้อยละการกำจัดนิกเกิลเทียบกับเวลา เมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลในสารละลายมีค่าแตกต่างกัน จากผลการทดลอง พบว่า นิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียจนมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ณ นาทีที่ 14 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลในสารละลายมีค่าสูงกว่า 510 mg/L ทั้งนี้คิดเป็นร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่ 99.9% และ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลในสารละลายมีค่าน้อย เช่น ที่ 254 mg/L นิกเกิลจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียด้วยเวลาที่สั้นลง รูปที่ 4.8 แสดงผลการกำจัด 99.6% นิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีค่าความ

เข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น 254 mg/L ได้ภายในเวลา 9 นาที และเมื่อคิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิล โดยพิจารณาจากอัตราส่วนปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดได้ (μmol) ต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบในเซลล์เคมีไฟฟ้า (Ampxs) (Vlachou และคณะ, 2013) จะได้ว่าอัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิล มีค่า 0.63, 0.40, 0.34 และ 0.25 $\mu\text{mol}\cdot\text{Amp}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นที่ 1012, 646, 510 และ 254 mg/L ตามลำดับ ดังนั้นการปรับลดความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลให้มีย่าน้อยลง จึงไม่ช่วยให้อัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิลดีขึ้น แม้จะใช้เวลาในการกำจัดสั้นลงก็ตาม นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของนิกเกิลให้สูงกว่าปริมาณที่มีอยู่ในน้ำเสียจริง ก็ไม่พึงปฏิบัติ แม้อัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิลจะสูงขึ้นก็ตาม

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละและอัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิล จนมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งเมื่อความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นมีค่าแตกต่างกัน

| ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น (mg/L) | ร้อยละการกำจัด (%) | อัตราการกำจัดนิกเกิล ($\mu\text{mol}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) | เวลาที่นิกเกิลผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที) |
|-----------------------------------|--------------------|--|---|
| 1012 | 99.9 | 0.6338 | 14 |
| 646 | 99.9 | 0.4044 | 14 |
| 510 | 99.8 | 0.3437 | 13 |
| 254 | 99.6 | 0.2463 | 9 |

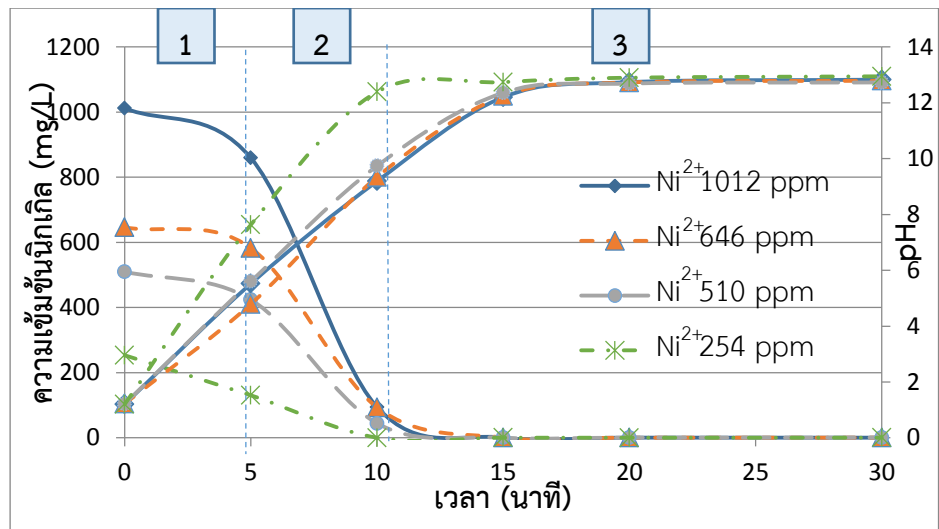
การที่อัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิลแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลไอออนในสารละลาย สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมีที่ 4-7 และ 4-9 เมื่อไอออนนิกเกิลซึ่งเป็นสารตั้งต้นของทั้งสองปฏิกิริยามีปริมาณมากขึ้น การดำเนินไปของปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้การกำจัดนิกเกิลไอออนออกจากสารละลายดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การลดลงของนิกเกิลแปรผกผันกับค่าพีเอชของสารละลาย ดังข้อมูลที่น่าแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 ทั้งนี้จากลักษณะข้อมูลแสดงการลดลงของนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นมากกว่า 510 mg/L พบว่า สามารถแบ่งช่วงของการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง โดย

ช่วงที่ 1 ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลลดลงไม่เร็วมากนัก สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่า pH ของสารละลาย ที่มีค่าขยับเข้าสู่สภาวะที่เป็นกรดอ่อนๆ หรือ เป็นกลางมากขึ้น (pH 5-6) ซึ่งคาดว่า เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลไอออนกลายเป็นโลหะนิกเกิลสีเขียว (ปฏิกิริยาที่ 4-7) และปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอน (H^+) กลายเป็นฟองแก๊สไฮโดรเจน (H_2) (ปฏิกิริยาที่ 4-6)

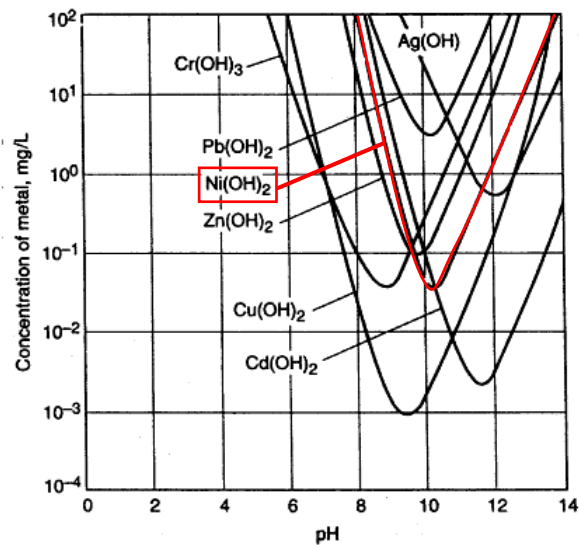
ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาทั้งสองเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังนั้นการเกิดฟองแก๊สไฮโดรเจน บริเวณผิวขั้วไฟฟ้าจึงเป็นการขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลไอออน ส่งผลให้นิกเกิลเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ไม่ดีเท่าที่ควร การลดลงของนิกเกิลจึงเกิดขึ้นได้ไม่มากในช่วงเวลานี้

ช่วงที่ 2 ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลลดลงอย่างรวดเร็ว พร้อมกับค่า pH ของสารละลายที่ปรับเพิ่มขึ้นจากสถานะที่เป็นกรดอ่อนๆ หรือ เป็นกลาง (ไอออน H^+ ในสารละลายมีปริมาณน้อย) เข้าสู่สถานะที่เป็นเบส (pH 9-10) อันเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลาย และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) (ปฏิกิริยาที่ 4-8) โดยไฮดรอกไซด์ไอออนนั้นนอกจากจะทำให้สารละลายมีค่า pH เพิ่มขึ้นแล้ว ยังช่วยเสริมการกำจัดนิกเกิลออกจากสารละลายผ่านการตกตะกอนในรูปของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (ปฏิกิริยาที่ 4-9) อีกด้วย โดยรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า นิกเกิลสามารถตกตะกอนในรูปของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ได้ดีในช่วง pH 8-10 ดังนั้นปริมาณนิกเกิลในช่วงเวลาการกำจัดนี้จึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการกำจัดนิกเกิลผ่านทั้งกระบวนการรีดักชันด้วยไฟฟ้า (ปฏิกิริยาที่ 4-7) และการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ไอออน (ปฏิกิริยาที่ 4-9)

ช่วงที่ 3 ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 1 mg/L) ในขณะที่ค่า pH ของสารละลายยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนเข้าใกล้ค่า pH 13 ในช่วงนี้การกำจัดนิกเกิลผ่านปฏิกิริยาที่ 4-7 และ 4-9 ดำเนินไปได้เล็กน้อยตามปริมาณของนิกเกิลที่คงอยู่ในสารละลาย ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ (ปฏิกิริยาที่ 4-8) ยังเกิดขึ้นได้ดี เป็นผลให้พบการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในสารละลาย หากแต่การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชที่มากกว่า 12 จำเป็นต้องมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนจำนวนมากค่อนข้างมาก ดังนั้น ในผลการทดลอง (รูปที่ 4.9) จึงพบการเพิ่มขึ้นของค่า pH อย่างช้าๆ หรือแทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง เมื่อ pH ของสารละลายมีค่าสูง



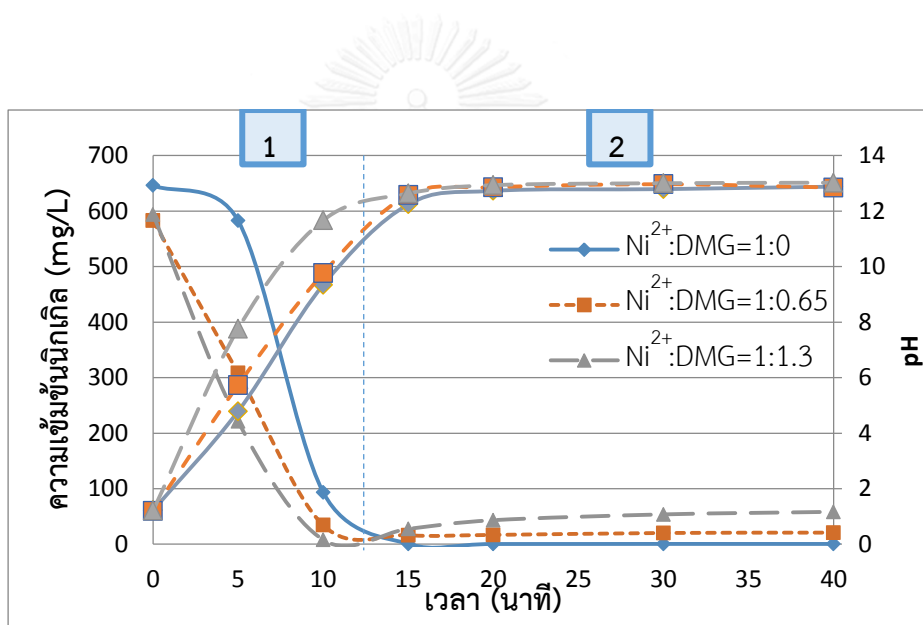
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นนิกเกิลและค่าพีเอชเทียบกับเวลา เมื่อนิกเกิลมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ (Metcalf และ Eddy, 2003)

4.2.3 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, DMG)

ทำการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ DMG ที่มีต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากสารละลาย โดยเปรียบเทียบการกำจัดนิกเกิลในสภาวะที่ไม่มี DMG และมีปริมาณ DMG น้อยกว่า และมากกว่าปริมาณนิกเกิล ที่ค่าอัตราส่วนโมล $\text{Ni}^{2+}:\text{DMG}$ เท่ากับ 1:0, 1:0.65 และ 1:1.3 ตามลำดับ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบก้นสารละลายด้วยผนังวน ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดเป็น โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ น้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้น 1.2 ตรวจสอบความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสยเป็นระยะตลอดการทดลอง

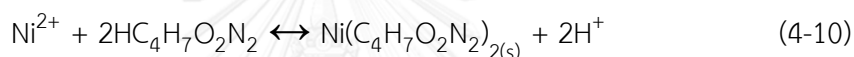


รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นนิกเกิลและค่าพีเอชของสารละลายเทียบกับเวลา เมื่อมีค่าอัตราส่วนโมลของ DMG ในสารละลายที่ต่างกัน

จากผลการทดลอง พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของนิกเกิลและค่าพีเอชเทียบกับเวลาสามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 2 ช่วง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 กล่าวคือ

ในช่วงที่ 1 ความเข้มข้นนิกเกิลมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่ใช้ในการกำจัด โดยในนาทีที่ 12 ความเข้มข้นนิกเกิลมีค่า 20, 5 และ 0 mg/L หรือ คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 96.9, 98.6 และ 100.0 ในสารละลายที่มีอัตราส่วนโมล $\text{Ni}^{2+}:\text{DMG}$ เป็น 1:0, 1:0.65 และ 1:1.3 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการลดลงของนิกเกิลในสารละลาย พบว่า สารละลายที่มี DMG เป็นส่วนประกอบ แสดงการลดลงของนิกเกิลแบบเส้นตรงเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการกำจัด ในขณะที่การลดลงของนิกเกิลใน

สารละลายที่ไม่มี DMG เป็นส่วนประกอบ จะมีลักษณะผสมของความเข้มข้นที่ลดลงอย่างช้าๆ ในตอนต้นของการกำจัด ตามด้วยการลดลงแบบความสัมพันธ์เส้นตรงในระยะเวลาต่อมา ทั้งนี้สีตะกอนที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองก็มีความแตกต่างกัน โดยสังเกตพบตะกอนสีแดงสดของ $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ ในสารละลายที่มี DMG เป็นส่วนประกอบ (ปฏิกิริยาที่ 4-10) ตั้งแต่นาทีแรกๆ ของการกำจัดด้วยเคมีไฟฟ้า (รูปที่ 4.12) โดยนิกเกิลไอออนจะแทนที่ H^+ ของ DMG กลายเป็นตะกอนสีแดงของ $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ และไม่พบตะกอนชนิดนี้ในสารละลายที่ไม่มี DMG เป็นส่วนประกอบ จากข้อมูลผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า DMG สามารถช่วยให้การกำจัดนิกเกิลเกิดได้เร็วขึ้น ผ่านการตกตะกอนสีแดงในรูปของ $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเพิ่มเติม นอกเหนือจากการกำจัดนิกเกิลผ่านปฏิกิริยารีดักชัน เกิดเป็นตะกอนโลหะนิกเกิล $\text{Ni}(\text{s})$, และ ตกตะกอน $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ดังที่ได้บรรยายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ทั้งนี้สารละลายที่มีปริมาณ DMG มากสามารถกำจัดนิกเกิลออกจากสารละลายได้เร็วกว่าสารละลายที่มีปริมาณ DMG น้อย หรือไม่มีเลย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 สีของตะกอนที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง ณ นาทีที่ 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 เมื่ออัตราส่วนโมล $\text{Ni}^{2+}:\text{DMG}$ เป็น (ก) 1:0.65 (ข) 1:1.3

ในช่วงที่ 2 ความเข้มข้นนิกเกิลในสารละลายมีค่าน้อย และพบการเพิ่มขึ้นของนิกเกิลในสารละลายที่มี DMG เป็นส่วนประกอบเมื่อเวลาในการกำจัดเพิ่มขึ้นโดย ณ นาทีที่ 40 ความเข้มข้นนิกเกิลในสารละลายมีค่า 0.5, 20.9 และ 58.3 mg/L หรือ คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.9, 96.4 และ 90.2 ในสารละลายที่มีอัตราส่วนโมล Ni^{2+} :DMG เป็น 1:0, 1:0.65 และ 1:1.3 ตามลำดับ พร้อมกันนี้ยังสังเกตพบการหายไปของตะกอนแดง เมื่อ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า 12 โดยตะกอนแดงของสารละลายที่มีอัตราส่วนโมล Ni^{2+} :DMG เป็น 1:1.3 หายไปเร็วกว่าในสารละลายที่มีอัตราส่วนโมล Ni^{2+} :DMG เป็น 1:0.65 (รูปที่ 4.12) จากข้อมูลของผลการทดลองนี้ คาดได้ว่าในสารละลายที่มี DMG เป็นส่วนประกอบ น่าจะเกิดการละลายของตะกอน $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ เมื่อ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า 12 ทำให้ตรวจพบปริมาณนิกเกิลไอออนในสารละลายมากขึ้น ในขณะที่ค่า pH ของสารละลายยังไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด $\text{Ni}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าอัตราการละลายตะกอนของ $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของสารละลายที่ไม่มี DMG เป็นส่วนประกอบ ที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นนิกเกิลในสารละลาย เนื่องจากในสารละลายดังกล่าวไม่มีตะกอนแดงของ $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ ตกจมอยู่ด้วย ดังนั้น ณ นาทีการกำจัดที่ 40 สารละลายที่ไม่มี DMG เป็นองค์ประกอบจึงมีค่าร้อยละการกำจัดนิกเกิลสูงกว่าสารละลายที่มี DMG เป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 4.4 แสดงสรุปของสีและรูปแบบตะกอนที่เกิดขึ้น พร้อมค่าพีเอชของสารละลาย จากข้อมูลทั้งหมดข้างต้น โดยจะเห็นได้ว่า ถึงแม้ DMG จะมีส่วนช่วยให้การกำจัดนิกเกิลเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าสารละลายที่ไม่มี DMG เป็นส่วนประกอบในช่วงต้นของการกำจัด ผ่านการเพิ่มการตกตะกอนแดงในรูปของ $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ แต่เมื่อ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า 12 ตะกอน $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ สามารถละลายกลับ ทำให้พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณนิกเกิลในสารละลายอีกครั้ง ฉะนั้นการกำจัดนิกเกิลในสารละลายที่มี DMG เป็นองค์ประกอบจะต้องทำอย่างระมัดระวัง โดยควบคุมไม่ให้ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า 12 และเนื่องจากน้ำเสียตัวอย่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่ปรากฏว่ามี DMG เป็นส่วนประกอบ จึงไม่ต้องระวังเรื่องการละลายกลับของตะกอนแดง $\text{Ni}(\text{DMG})_2$ นี้

ตารางที่ 4.4 สรุปสีและรูปแบบตะกอนที่เกิดขึ้นพร้อมค่าพีเอชของสารละลาย

| เวลา (นาทีก) | Ni ²⁺ :DMG เท่ากับ 1:0 | | | Ni ²⁺ :DMG เท่ากับ 1:0.65 และ 1:1.3 | | |
|-----------------|-----------------------------------|----------|----------------------------|--|------------------------|---|
| | สีตะกอน | ค่าพีเอช | รูปแบบการตกตะกอนของนิเกิล | สีตะกอน | ค่าพีเอช | รูปแบบการตกตะกอนของนิเกิล |
| 0-5 | เขียว | 1.2-4.8 | Ni(s) | แดง | 1.2-5.7, 1.2-7.8 | Ni(s), Ni(DMG) ₂ |
| 5-12 | เขียว | 4.8-9.3 | Ni(s), Ni(OH) ₂ | แดง | 5.7-9.8, 7.8-11.7 | Ni(s), Ni(DMG) ₂ , Ni(OH) ₂ |
| 12-40 | เขียว | 9.3-12.9 | Ni(s), Ni(OH) ₂ | เขียว | 9.8-12.9, 11.7-13.0 | Ni(s), Ni(OH) ₂ |

4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัด

จากผลการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ ในถังปฏิกิริยาที่มีการกั้นสารละลายด้วยผนังที่เตรียมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว พบว่า การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนไอต์เป็นโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ และปรับค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียให้เป็น 1.2 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ สามารถลดความเข้มข้นของนิเกิลลงจาก 646 mg/L มาเป็น 1 mg/L ภายในเวลา 14 นาที หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดนิเกิลที่ 99.9% ซึ่งปริมาณนิเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ณ นาทีการกำจัดที่ 14 มีค่าผ่านเกณฑ์เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้มีปริมาณนิเกิลในน้ำทิ้งได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดนิเกิลด้วยวิธีข้างต้นนี้ จะพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายที่จำเป็นสำหรับกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าเท่านั้น อันได้แก่ ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า โดยไม่รวมถึงค่าถังปฏิกิริยา ค่าวิเคราะห์ ค่าเครื่องมือที่ใช้จ่ายไฟ และอื่นๆ เนื่องจากการทดลองนี้เป็นเพียงการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการนำวิธีดังกล่าวไปใช้งานและศึกษาผลกระทบจากสภาวะต่างๆ ที่อาจมีต่อการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียเท่านั้น

4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ฟังซ์ไฟฟ้าแอโนด โดยใช้ราคาสารเคมีในระดับอุตสาหกรรมที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ ราคา 23 บาทต่อกิโลกรัม และโซเดียมคลอไรด์ราคา 12 บาทต่อกิโลกรัม

คำนวณค่าใช้จ่ายของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย การทดลองนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ปริมาตรประมาณ 10 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียปริมาตร 170 มิลลิลิตร

ค่าใช้จ่ายสำหรับ NaOH

$$\begin{aligned}
 & 10 \text{ mL NaOH} \times \frac{6 \text{ mol NaOH}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{40 \text{ g}}{1 \text{ mol NaOH}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{23 \text{ บาท}}{1 \text{ kg NaOH}} \\
 = & \frac{(646 - 1) \text{ mg Ni}^{2+}}{1 \text{ L น้ำเสีย}} \times 170 \text{ mL น้ำเสีย} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \\
 = & 503 \text{ บาทต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด}
 \end{aligned}$$

คำนวณค่าใช้จ่ายของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟังซ์ไฟฟ้าแอโนด โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียปริมาตร 170 มิลลิลิตร

ค่าใช้จ่ายสำหรับ NaCl

$$\begin{aligned}
 & 160 \text{ mL NaCl} \times \frac{0.5 \text{ mol NaCl}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{58.5 \text{ g}}{1 \text{ mol NaCl}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{12 \text{ บาท}}{1 \text{ kg NaCl}} \\
 = & \frac{(646 - 1) \text{ mg Ni}^{2+}}{1 \text{ L น้ำเสีย}} \times 170 \text{ mL น้ำเสีย} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \\
 = & 512 \text{ บาทต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด}
 \end{aligned}$$

รวมค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีทั้งสิ้นเท่ากับ 1,015 บาทต่อการกำจัดนิกเกิล 1 กิโลกรัม

4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า

การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้า โดยมีสูตรการคำนวณ ดังนี้

กำลังไฟฟ้า

$$= \frac{\text{กระแสไฟฟ้า (A)} \times \text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{เวลา (hr)}}{\text{ปริมาณโลหะที่ถูกกำจัด (kg)}}$$

$$= \frac{5.5 \text{ A} \times 14.4 \text{ V} \times \left(14 \text{ min} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}\right) \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}}{\frac{(646 - 1) \text{ mg Ni}^{2+}}{1 \text{ L น้ำเสีย}} \times 170 \text{ mL น้ำเสีย} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$= 168.5 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด}$$

ค่าไฟฟ้า = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ × (ค่าหน่วย/หน่วย)

$$= \frac{168.5 \text{ kW.hr}}{1 \text{ kg Ni}} \times \frac{2.5 \text{ บาท}}{1 \text{ kW}\cdot\text{hr}}$$

$$= 421 \text{ บาทต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด}$$

ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าที่ใช้ มีค่า 421 บาทต่อการกำจัดนิกเกิล 1 กิโลกรัม
 สรุปรวมค่าใช้จ่ายในการกำจัดนิกเกิลทั้งหมด (ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี + ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า)
 มีค่า 1,436 บาทต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด

4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยก่อนหน้า ที่ทำการกำจัดนิกเกิลโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า พบว่า งานวิจัยของ ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์ (2542) และของ ศรีณัฐ ศรีธัญรัตน์ (2553) ศึกษาการกำจัดนิกเกิลโดยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับงานวิจัยฉบับนี้ โดยงานวิจัยของ ฉัฐบรรณ ทำการศึกษาในถังปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อสารละลาย ซึ่งสามารถกำจัดนิกเกิลได้เพียงร้อยละ 90 เมื่อใช้เวลากำจัดมากกว่า 8 ชั่วโมง ในขณะที่ ศรีณัฐ ทำการศึกษาในถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลายชนิดเดียวกันกับงานวิจัยฉบับนี้ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากถึง 99.7% ภายในเวลา 90 นาที ซึ่งรวดเร็วกว่าสภาวะการกำจัดที่ ฉัฐบรรณ ได้นำเสนอไว้มาก แต่ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายจากงานวิจัยทั้งสอง คือ 100 mg/L และ 4.1 mg/L ก็ยังคงไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานฯ ที่ระบุให้มีปริมาณนิกเกิลในน้ำทิ้งได้ไม่เกิน 1 mg/L ทั้งนี้การปรับใช้สภาวะการกำจัดนิกเกิลที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยฉบับนี้ ทั้งการปรับเพิ่มค่า pH เริ่มต้นของสารละลายและปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ได้ช่วยให้การกำจัดนิกเกิลเกิดได้ดีขึ้น โดยสามารถกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียได้ถึง 99.9% ภายในเวลา 14 นาที และค่าความเข้มข้นสุดท้ายของนิกเกิลในสารละลายมีค่าเพียง 1 mg/L ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่โรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้



ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบข้อมูลงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ใกล้เคียง

| หัวข้อ | ฉัฐบรรณ วรณรัตน์ | ศรัณยู ศรีธัญรัตน์ | งานวิจัยนี้ |
|--|----------------------|-------------------------|----------------------|
| 1. ปีที่ทำการวิจัย | 2542 | 2553 | 2558 |
| 2. โลหะหนักที่กำลังจัด | Ni ²⁺ | | |
| 3. แหล่งที่มาของตัวอย่าง | น้ำเสียสังเคราะห์ | น้ำเสียห้องปฏิบัติการ | |
| 4. ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni ²⁺ | 1,000 mg/L | 1,281 mg/L | 646.1 mg/L |
| 5. ค่าพีเอชเริ่มต้น | 3.3 | 1 | 1.2 |
| 6. รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า | ไม่มีรอยต่อ | มีรอยต่อ โดยใช้ผนังวุ้น | |
| 7. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด | เหล็กกล้าไร้สนิม | แกรไฟต์ | |
| 8. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด | ไทเทเนียม | แกรไฟต์ | |
| 9. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด | - | 0.5 M NaCl | |
| 10. ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมในการทดลอง | กระแสไฟฟ้า | | |
| 11. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับการกำจัดโลหะหนัก | 140 A/m ² | | 382 A/m ² |
| 12. ความเข้มข้นสุดท้ายของ Ni ²⁺ | 100 mg/L | 4.1 mg/L | 1 mg/L |
| 13. ร้อยละการกำจัด Ni ²⁺ | 90% | 99.7% | 99.9% |
| 14. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni ²⁺ | 8.15 ชั่วโมง | 90 นาที | 14 นาที |
| 15. ค่าใช้จ่ายในการกำจัด (ค่าสารเคมี + ค่าไฟฟ้า) (บาท/Kg ของ Ni ²⁺ ที่ถูกกำจัด) | - | 1,616 | 1,436 |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า แบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ น้ำเสียมีปริมาณนิกเกิลเริ่มต้น 750 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 0.4

1. จากการศึกษาสภาวะการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีพบว่า ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อที่กั้นสารละลายด้วยผนังวันที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์อิมิตัว สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้มากและกำจัดนิกเกิลได้ โดยชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดที่ให้ผลการกำจัดนิกเกิลที่ดีที่สุดคือ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งนิกเกิลถูกกำจัดได้ร้อยละ 99 ที่เวลา 80 นาที และเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1.2 พบว่าสามารถกำจัดนิกเกิลได้ร้อยละ 99.9 ในเวลา 14 นาที ณ ค่าความหนาแน่นกระแส 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

2. พิจารณาความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี พบว่า นิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียจนมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ณ นาทีที่ 14 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลในสารละลายมีค่าสูงกว่า 510 mg/L คิดเป็นร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่ 99.9% และ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลในสารละลายมีค่าน้อย ที่ 254 mg/L นิกเกิลจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียภายในเวลา 9 นาที คิดเป็นร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่ 99.6% เมื่อคิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิล พบว่าความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นที่มีค่าสูง มีอัตราเร็วในการกำจัดนิกเกิลสูงกว่าความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นที่มีค่าต่ำ ดังนั้นการปรับลดความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลให้มิต่ำลง หรือเพิ่มความเข้มข้นของนิกเกิลให้สูงกว่าปริมาณที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงจึงไม่พึงปฏิบัติ

3. พิจารณาความเข้มข้น DMG เริ่มต้นที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี พบว่า DMG มีส่วนช่วยให้การกำจัดนิกเกิลเกิดขึ้นได้รวดเร็วมากกว่าสารละลายที่ไม่มี DMG เป็นส่วนประกอบในช่วงต้นของการกำจัด โดยอัตราส่วนโมล Ni^{2+} :DMG ที่ 1:1.3 สามารถกำจัดนิกเกิลได้สูงสุดที่ ร้อยละการกำจัด 100 % ณ นาทีที่ 12 และควรควบคุมไม่ให้ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า 12 เนื่องจากสารละลายที่มี DMG เป็นส่วนประกอบจะเกิดการละลายกลับ

ของนิกเกิลจากตะกอน Ni(DMG)_2 แต่เนื่องจากน้ำเสียตัวอย่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่ปรากฏว่ามี DMG เป็นส่วนประกอบ จึงไม่ต้องระวังเรื่องการละลายกลับของตะกอนแดง Ni(DMG)_2 นี้

4. พลังงานที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า แบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ คือ 168.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด คิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 421 บาทต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด และค่าสารเคมีประมาณ 1,015 บาทต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 1,436 บาทต่อกิโลกรัมของนิกเกิลที่ถูกกำจัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เสนอให้มีการขยายสเกลของถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายที่กั้นสารละลาย ด้วยแผ่นแก้วพอรนเพื่อให้มีการปรับกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น
2. เสนอให้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า แบบควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
3. หากทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น เสนอให้ปรับค่าพีเอชด้วยสารละลายอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) และ ปูนขาว (CaOH_2) เป็นต้น เนื่องจากปูนขาวมีราคาถูก และการปรับค่าพีเอช ด้วยสารที่แตกต่างกันจะทำให้ไอออนที่เข้าทำปฏิกิริยากับนิกเกิลแตกต่างกันด้วย จึงอาจส่งผลต่อการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสีย
4. เสนอให้มีการศึกษาความเหมาะสมของปริมาณน้ำเสียฝังชั่วคราวไฟฟ้าแคโทดและฝังชั่วคราวไฟฟ้าแอโนดที่แตกต่างกัน
5. เสนอให้มีการศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดนิกเกิล
6. ในการศึกษาผลของความเข้มข้นนิกเกิลและ DMG เริ่มต้น ไม่ควรใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1.2 เนื่องจากทำให้เวลาในการกำจัดนิกเกิลเร็วเกินไป (14 นาที) ที่จะเห็นผลกระทบบจากปัจจัยทั้ง 2

5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการกำจัดนิกเกิล โดยสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปปรับใช้ให้เกิดประโยชน์กับโรงงานอุตสาหกรรม โดยการขยายสเกล (Scale up) สิ่งที่ต้องทราบ ก็คือกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดสารละลายหรือเรียกว่าค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) และพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell volume ratio) โดยจะใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม และใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายให้มีค่าเท่ากัน (Cameselle และคณะ, 2005)



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. 2543. มาตรฐานคุณภาพน้ำและเกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำในประเทศไทย.

กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2551. โลหะกับการพัฒนาประเทศ. กรุงเทพฯ: กองอุตสาหกรรมพื้นฐาน.

กิตติพงษ์ วิคุณประเสริฐ and พรพรรณ ตูลาภรณ์. 2553. การนำนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า. วิทยาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กิตติพันธ์ บางยี่ขัน. 2557. โลหะกับการพัฒนาประเทศ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125&articleid=3269>. [1 มกราคม 2557]

ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์. 2542. ผลของตัวแปรต่ออิเล็กโทรดโพสิชันของนิกเกิล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท บัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. 2547. เทคนิคการแยก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. 2548. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

นงเยาว์ จโนภาส. 2546. การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในการตกตะกอนโลหะหนัก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปทุมทิพย์ เสมอภาค, มะลิ หุ่นสม and เกี้ยวลี พฤชาทร. 2550. การขจัดนิกเกิลจากสารละลายเจือจางโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบผ้าคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท บัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรพรรณ อุดมกาญจนนันท์ and สุชาติ จูนวนวัฒน์กุล. 2551. ปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2552. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค. 2558. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th/download/pwastandard50-1.pdf>. [10 October 2558]
- ลาวัลย์ ศรีพงศ์. 2543. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียแป้นโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณิดา จิระชัยพันธุ์. 2554. การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใยเรยอนที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศรัณยู ศรีชัยรัตน์. 2553. การกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สิริวิชญ์ เดชธรรม. 2557. อันตรายของนิกเกิล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://summacheeva.org/index_thaitox_nickel.htm. [1 มกราคม 2557]
- สุทธิพร จิตต์มิตรภาพ. 2551. คู่มือแนวปฏิบัติที่ดีด้านการบริหารจัดการสารเคมีและของเสียอันตรายภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. CHULALONGKORN UNIVERSITY
- หทัยทัต ชื่อสุวรรณ. 2544. การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- ASTM D512 – 12. Standard Test Methods for Chloride Ion In Water. [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D512.html>. [1 October 2015]
- ASTM D1886 – 14. Standard Test Methods for Nickel in Water. [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D1886.html>. [1 October 2015]
- ASTM E70-07. Standard Test Method for pH of Aqueous Solutions With the Glass Electrode. [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/E70.html>. [1 October 2015]
- Bohdziewicz, J., Bodzek, M. and Wqsik, E. 1999. The application of reverse osmosis and nanofiltration to the removal of nitrates from groundwater. Desalination. 121, 139-147.
- Cameselle, C., Pazos, M. and Sanroman, M. A. 2005. Selection of an eletrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Chemosphere. 60, 1080-1086.
- Coman, V., Robotin, B. and Ilea, P. 2013. Nickel recovery/removal from industrial wastes: A review. Resources, Conservation and Recycling. 73, 229-238.
- Dabrowski, A., Hubicki, Z., Podkoscielny, P. and Robens, E. 2004. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. Chemosphere. 56, 91-106.
- Denkhaus, E. and Salnikow, K. 2002. Nickel essentiality, toxicity and carcinogenicity. Critical Reviews in Oncology-Hematology. 42, 35-56.
- Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York : McGraw-Hill:
- Fu, F. and Wang, Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. J Environ Manage. 92, 407-418.
- Hernandez-Tapia, J. R., Vazquez-Arenas, J. and Gonzalez, I. 2013. Electrochemical reactor with rotating cylinder electrode for optimum electrochemical recovery of nickel from plating rinsing effluents. J Hazard Mater. 262, 709-716.
- Hogg, D. 2011. Nickel recovery from waste material with oxime complexants. [Online]. Available: <http://www.google.fr/patents/WO2011027094A1?cl=en>. [1 January 2014]

- Kasprzak, K., Sunderman, F. and K., S. 2003. Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis. Mutation Research. 533, 67-97.
- Mansi- Al, N. M. and Monem- Abdel, N. M. 2002. Recovery of nickel oxide from spent catalyst. Waste Management. 22, 85-90.
- Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater Engineering Treatment Treatment and Reuse. U.S.A. : McGraw-Hill
- Orhan, G., Arslan, C., Bombach, H. and Stelter, M. 2002. Nickel recovery from the rinse waters of plating baths. Hydrometallurgy. 65, 1-8.
- Orinakova, R., Strečková, M., Trnková, L., Rozik, R. and Gálová, M. 2006. Comparison of chloride and sulphate electrolytes in nickel electrodeposition on a paraffin impregnated graphite electrode. Journal of Electroanalytical Chemistry. 594, 152-159.
- Paul Chen, J. and Lim, L. L. 2005. Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. Chemosphere. 60, 1384-1392.
- Pertorius, W., Johannes, W. and Lempert, G. 1991. Electrolytic Iron flocculants production with bipolar electrode in series arrangement. Water SA. 17, 113 – 133.
- Polprasert, C. 1996. Chromium Removal by a Bipolar Electro-Chemical Precipitation Process. Water Science and Technology. 34, 109-116.
- Qin, J., Wai, M., Oo, M. and Wong, F. 2002. A feasibility study on the treatment and recycling of a wastewater from metal plating. Journal of Membrane Science. 208, 213-221.
- Robotin, B., Ispas, A., Coman, V., Bund, A. and Ilea, P. 2013. Nickel recovery from electronic waste II electrodeposition of Ni and Ni-Fe alloys from diluted sulfate solutions. Waste Manag. 33, 2381-2389.
- Subbaiah, T., Mallick, S. C., Mishra, K. G. and Sanjay, K. R. P. D. 2002. Electrochemical precipitation of nickel hydroxide. Journal of Power Sources. 112, 562-569.
- Van, B. and Vandecasteele, C. 2003. Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration. Environmental Pollution. 122, 435-445.

- Vlachou, M., Hahladakis, J. and Gidarakos, E. 2013. Effect of various parameters in removing Cr and Ni from model wastewater by using electrocoagulation Global NEST. 15, 494-503.
- Xu, Z., Libao, G., Chengzhi, H., Huijuan, L. and Jiuwei, Q. 2014. Simultaneous destruction of Nickel(II)-EDTA with TiO₂/Ti film anode and electrodeposition of nickel ions on the cathode. Applied Catalysis B: Environmental. 144, 478-485.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 3.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สำหรับถังปฏิกิริยาที่มีการกั้นสารละลายด้วยผนังงู้นและกั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอรุน

| เวลา (นาที) | กั้นสารละลายด้วยผนังงู้น | | | กั้นสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอรุน | | |
|----------------|--------------------------|-----------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------|
| | pH | ความเข้มข้นนิเกิล (mg/L) | % Remove | pH | ความเข้มข้นนิเกิล (mg/L) | % Remove |
| 0 | 0.41 | 727.50 | 0.00 | 0.36 | 739.40 | 0.00 |
| 15 | 0.54 | 713.50 | 1.92 | 0.36 | 725.50 | 1.88 |
| 30 | 0.53 | 774.50 | 0.00 | 0.42 | 753.60 | 0.00 |
| 45 | 0.45 | 720.30 | 0.99 | 0.43 | 713.80 | 3.46 |
| 60 | 0.42 | 733.90 | 0.00 | 0.42 | 724.60 | 2.00 |
| 75 | 0.43 | 720.10 | 1.02 | 0.55 | 827.20 | 0.00 |
| 90 | 0.39 | 705.60 | 3.01 | 0.58 | 801.90 | 0.00 |
| 105 | 0.47 | 696.70 | 4.23 | 0.60 | 751.20 | 0.00 |
| 120 | 0.48 | 699.20 | 3.89 | 0.58 | 780.80 | 0.00 |
| 135 | 0.43 | 708.90 | 2.56 | 0.58 | 816.90 | 0.00 |
| 150 | 0.46 | 790.40 | 0.00 | 0.58 | 821.10 | 0.00 |
| 165 | 0.40 | 719.90 | 1.04 | 0.52 | 825.90 | 0.00 |
| 180 | 0.43 | 662.00 | 9.00 | 0.53 | 850.40 | 0.00 |
| 195 | 0.46 | 717.40 | 1.39 | 0.58 | 735.50 | 0.53 |
| 210 | 0.49 | 679.90 | 6.54 | 0.61 | 702.80 | 4.95 |
| 225 | 0.45 | 663.80 | 8.76 | 0.59 | 771.10 | 0.00 |
| 240 | 0.41 | 697.10 | 4.18 | 0.52 | 716.90 | 3.04 |

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 20 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสลงมาให้คงที่ที่ 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตรสำหรับถึงปฏิกิริยาที่มีการกัสนสารละลายด้วยผนังรู้น

| เวลา (นาที) | pH | ความเข้มข้นนิเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|----------------|-------|--------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 0.41 | 712.60 | 789.00 | 749.30 | 750.30 | 38.21 | 0.00 |
| 20 | 0.93 | 639.80 | 532.00 | 546.90 | 572.90 | 58.41 | 23.64 |
| 25 | 1.05 | 460.90 | 530.90 | 512.50 | 501.43 | 36.29 | 33.17 |
| 30 | 1.19 | 431.70 | 432.60 | 402.50 | 422.27 | 17.12 | 43.72 |
| 35 | 1.41 | 378.80 | 390.10 | 378.90 | 382.60 | 6.50 | 49.01 |
| 40 | 1.93 | 326.70 | 376.80 | 323.10 | 342.20 | 30.02 | 54.39 |
| 45 | 4.41 | 255.80 | 306.40 | 262.70 | 274.97 | 27.44 | 63.35 |
| 50 | 7.47 | 217.65 | 230.52 | 134.79 | 194.32 | 51.95 | 74.10 |
| 55 | 8.15 | 172.20 | 198.42 | 112.11 | 160.91 | 44.25 | 78.55 |
| 60 | 8.33 | 135.63 | 155.37 | 94.53 | 128.51 | 31.04 | 82.87 |
| 70 | 9.21 | 61.52 | 76.47 | 52.30 | 63.43 | 12.20 | 91.55 |
| 80 | 11.47 | 7.68 | 15.53 | 5.00 | 9.40 | 5.47 | 98.75 |
| 90 | 11.83 | 5.83 | 4.55 | 4.33 | 4.90 | 0.81 | 99.35 |
| 100 | 12.22 | 5.81 | 2.63 | 3.26 | 3.90 | 1.68 | 99.48 |
| 110 | 12.43 | 5.18 | 2.33 | 3.20 | 3.57 | 1.46 | 99.52 |
| 120 | 12.57 | 5.15 | 2.31 | 2.74 | 3.40 | 1.53 | 99.55 |
| 150 | 12.73 | 6.45 | 2.76 | 2.69 | 3.94 | 2.15 | 99.47 |
| 180 | 12.88 | 5.97 | 5.97 | 2.42 | 3.55 | 2.51 | 99.53 |
| 210 | 13.08 | 5.97 | 2.98 | 2.32 | 3.76 | 1.95 | 99.50 |
| 240 | 13.14 | 5.81 | 2.29 | 2.18 | 3.43 | 2.06 | 99.54 |

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอโนด

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 0.41 | 712.60 | 789.00 | 749.30 | 750.30 | 38.21 | 0.00 |
| 20 | 0.93 | 639.80 | 532.00 | 546.90 | 572.90 | 58.41 | 23.64 |
| 25 | 1.05 | 460.90 | 530.90 | 512.50 | 501.43 | 36.29 | 33.17 |
| 30 | 1.19 | 431.70 | 432.60 | 402.50 | 422.27 | 17.12 | 43.72 |
| 35 | 1.41 | 378.80 | 390.10 | 378.90 | 382.60 | 6.50 | 49.01 |
| 40 | 1.93 | 326.70 | 376.80 | 323.10 | 342.20 | 30.02 | 54.39 |
| 45 | 4.41 | 255.80 | 306.40 | 262.70 | 274.97 | 27.44 | 63.35 |
| 50 | 7.47 | 217.65 | 230.52 | 134.79 | 194.32 | 51.95 | 74.10 |
| 55 | 8.15 | 172.20 | 198.42 | 112.11 | 160.91 | 44.25 | 78.55 |
| 60 | 8.33 | 135.63 | 155.37 | 94.53 | 128.51 | 31.04 | 82.87 |
| 70 | 9.21 | 61.52 | 76.47 | 52.30 | 63.43 | 12.20 | 91.55 |
| 80 | 11.47 | 7.68 | 15.53 | 5.00 | 9.40 | 5.47 | 98.75 |
| 90 | 11.83 | 5.83 | 4.55 | 4.33 | 4.90 | 0.81 | 99.35 |
| 100 | 12.22 | 5.81 | 2.63 | 3.26 | 3.90 | 1.68 | 99.48 |
| 110 | 12.43 | 5.18 | 2.33 | 3.20 | 3.57 | 1.46 | 99.52 |
| 120 | 12.57 | 5.15 | 2.31 | 2.74 | 3.40 | 1.53 | 99.55 |
| 150 | 12.73 | 6.45 | 2.76 | 2.69 | 3.94 | 2.15 | 99.47 |
| 180 | 12.88 | 5.97 | 5.97 | 2.42 | 3.55 | 2.51 | 99.53 |
| 210 | 13.08 | 5.97 | 2.98 | 2.32 | 3.76 | 1.95 | 99.50 |
| 240 | 13.14 | 5.81 | 2.29 | 2.18 | 3.43 | 2.06 | 99.54 |

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้โซเดียมคลอไรด์
อิมพัลส์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|--------------------------|------------|------------|--------|--------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 0.41 | 723.50 | 850.90 | 896.30 | 823.57 | 89.58 | 0.00 |
| 20 | 4.88 | 581.00 | 731.50 | 568.90 | 627.13 | 90.59 | 23.85 |
| 25 | 7.55 | 324.00 | 580.80 | 479.70 | 461.50 | 129.36 | 43.96 |
| 30 | 8.42 | 319.80 | 549.80 | 387.70 | 419.10 | 118.17 | 49.11 |
| 35 | 8.96 | 279.90 | 380.40 | 296.00 | 318.77 | 53.98 | 61.29 |
| 40 | 9.37 | 164.80 | 264.80 | 124.60 | 184.73 | 72.19 | 77.57 |
| 45 | 9.90 | 116.40 | 103.77 | 63.00 | 94.39 | 27.91 | 88.54 |
| 50 | 10.90 | 27.30 | 17.60 | 8.55 | 17.82 | 9.38 | 97.84 |
| 55 | 11.95 | 11.88 | 29.20 | 8.73 | 16.60 | 11.02 | 97.98 |
| 60 | 12.28 | 4.03 | 12.79 | 7.00 | 7.94 | 4.46 | 99.04 |
| 70 | 12.59 | 5.50 | 8.68 | 7.19 | 7.12 | 1.59 | 99.14 |
| 80 | 12.74 | 5.79 | 9.90 | 5.88 | 7.19 | 2.35 | 99.13 |
| 90 | 12.86 | 6.31 | 12.85 | 6.47 | 8.54 | 3.73 | 98.96 |
| 100 | 12.96 | 5.90 | 12.23 | 7.47 | 8.53 | 3.30 | 98.96 |
| 110 | 13.02 | 5.13 | 13.54 | 5.36 | 8.01 | 4.79 | 99.03 |
| 120 | 13.08 | 4.11 | 11.55 | 8.66 | 8.11 | 3.75 | 99.02 |
| 130 | 13.12 | 8.28 | 10.42 | 10.23 | 9.64 | 1.18 | 98.83 |
| 140 | 13.17 | 8.57 | 12.27 | 9.66 | 10.17 | 1.90 | 98.77 |
| 150 | 13.21 | 6.28 | 12.30 | 7.13 | 8.57 | 3.26 | 98.96 |

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้ประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนด

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|--------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 0.39 | 817.40 | 716.70 | 825.60 | 786.57 | 60.65 | 0.00 |
| 20 | 0.67 | 799.20 | 612.70 | 769.30 | 727.07 | 100.17 | 7.56 |
| 25 | 0.7 | 784.60 | 613.40 | 720.00 | 706.00 | 86.45 | 10.24 |
| 30 | 0.71 | 822.20 | 687.80 | 734.00 | 748.00 | 68.28 | 4.90 |
| 35 | 0.73 | 783.20 | 603.00 | 770.40 | 718.87 | 100.55 | 8.61 |
| 40 | 0.76 | 799.00 | 708.90 | 795.30 | 767.73 | 50.98 | 2.39 |
| 45 | 0.79 | 794.90 | 635.70 | 731.80 | 720.80 | 80.17 | 8.36 |
| 50 | 0.84 | 814.70 | 657.10 | 676.00 | 715.93 | 86.05 | 8.98 |
| 55 | 0.89 | 750.20 | 609.80 | 655.90 | 671.97 | 71.57 | 14.57 |
| 60 | 0.99 | 704.30 | 589.20 | 764.20 | 685.90 | 88.94 | 12.80 |
| 70 | 1.07 | 631.70 | 516.80 | 623.30 | 590.60 | 64.05 | 24.91 |
| 80 | 1.17 | 663.10 | 536.90 | 530.00 | 576.67 | 74.93 | 26.69 |
| 90 | 2.05 | 543.00 | 417.20 | 437.20 | 465.80 | 67.60 | 40.78 |
| 100 | 4.98 | 476.50 | 285.60 | 334.69 | 365.60 | 99.13 | 53.52 |
| 110 | 8.27 | 278.55 | 188.91 | 223.70 | 230.39 | 45.19 | 70.71 |
| 120 | 9.2 | 184.05 | 111.50 | 108.30 | 134.62 | 42.84 | 82.89 |
| 130 | 10.66 | 92.78 | 85.20 | 94.09 | 90.69 | 4.80 | 88.47 |
| 140 | 11.94 | 25.10 | 15.57 | 16.07 | 18.91 | 5.36 | 97.60 |
| 150 | 12.49 | 17.58 | 16.00 | 13.02 | 15.53 | 2.32 | 98.03 |

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้ น้ำเสียเป็น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอนด

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|------|--------------------------|------------|------------|--------|--------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 0.38 | 831.10 | 846.60 | 772.80 | 816.83 | 38.91 | 0.00 |
| 20 | 0.55 | 818.70 | 822.50 | 740.90 | 794.03 | 46.05 | 2.79 |
| 30 | 0.54 | 801.10 | 835.10 | 717.20 | 784.47 | 60.68 | 3.96 |
| 40 | 0.54 | 754.00 | 846.60 | 697.40 | 766.00 | 75.32 | 6.22 |
| 50 | 0.52 | 706.20 | 759.50 | 724.30 | 730.00 | 27.10 | 10.63 |
| 60 | 0.56 | 733.50 | 788.00 | 652.70 | 724.73 | 68.07 | 11.27 |
| 70 | 0.59 | 717.20 | 720.90 | 703.00 | 713.70 | 9.45 | 12.63 |
| 80 | 0.62 | 730.30 | 777.70 | 688.70 | 732.23 | 44.53 | 10.36 |
| 90 | 0.66 | 727.30 | 825.80 | 613.90 | 722.33 | 106.04 | 11.57 |
| 100 | 0.54 | 696.50 | 696.00 | 654.40 | 682.30 | 24.16 | 16.47 |
| 110 | 0.78 | 610.30 | 653.20 | 684.40 | 649.30 | 37.20 | 20.51 |
| 120 | 0.74 | 579.50 | 636.30 | 681.00 | 632.27 | 50.87 | 22.60 |
| 130 | 0.82 | 568.40 | 588.90 | 584.30 | 580.53 | 10.76 | 28.93 |
| 140 | 0.93 | 499.50 | 492.90 | 523.80 | 505.40 | 16.27 | 38.13 |
| 150 | 1.15 | 410.90 | 393.90 | 496.10 | 433.63 | 54.76 | 46.91 |

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยไม่ปรับค่าพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสีย

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 0.41 | 712.60 | 789.00 | 749.30 | 750.30 | 38.21 | 0.00 |
| 20 | 0.93 | 639.80 | 532.00 | 546.90 | 572.90 | 58.41 | 23.64 |
| 25 | 1.05 | 460.90 | 530.90 | 512.50 | 501.43 | 36.29 | 33.17 |
| 30 | 1.19 | 431.70 | 432.60 | 402.50 | 422.27 | 17.12 | 43.72 |
| 35 | 1.41 | 378.80 | 390.10 | 378.90 | 382.60 | 6.50 | 49.01 |
| 40 | 1.93 | 326.70 | 376.80 | 323.10 | 342.20 | 30.02 | 54.39 |
| 45 | 4.41 | 255.80 | 306.40 | 262.70 | 274.97 | 27.44 | 63.35 |
| 50 | 7.47 | 217.65 | 230.52 | 134.79 | 194.32 | 51.95 | 74.10 |
| 55 | 8.15 | 172.20 | 198.42 | 112.11 | 160.91 | 44.25 | 78.55 |
| 60 | 8.33 | 135.63 | 155.37 | 94.53 | 128.51 | 31.04 | 82.87 |
| 70 | 9.21 | 61.52 | 76.47 | 52.30 | 63.43 | 12.20 | 91.55 |
| 80 | 11.47 | 7.68 | 15.53 | 5.00 | 9.40 | 5.47 | 98.75 |
| 90 | 11.83 | 5.83 | 4.55 | 4.33 | 4.90 | 0.81 | 99.35 |
| 100 | 12.22 | 5.81 | 2.63 | 3.26 | 3.90 | 1.68 | 99.48 |
| 110 | 12.43 | 5.18 | 2.33 | 3.20 | 3.57 | 1.46 | 99.52 |
| 120 | 12.57 | 5.15 | 2.31 | 2.74 | 3.40 | 1.53 | 99.55 |
| 150 | 12.73 | 6.45 | 2.76 | 2.69 | 3.94 | 2.15 | 99.47 |

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 0.8

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 0.82 | 712.70 | 697.80 | 664.50 | 691.67 | 24.68 | 0.00 |
| 5 | 1.06 | 551.90 | 529.60 | 533.40 | 538.30 | 11.93 | 22.17 |
| 10 | 3.19 | 217.74 | 260.50 | 308.20 | 262.15 | 45.25 | 62.10 |
| 15 | 9.08 | 68.70 | 77.29 | 137.10 | 94.36 | 37.26 | 86.36 |
| 20 | 12.43 | 1.08 | 1.83 | 2.41 | 1.77 | 0.67 | 99.74 |
| 30 | 12.59 | 0.56 | 0.84 | 0.80 | 0.73 | 0.15 | 99.89 |
| 40 | 12.71 | 0.59 | 0.40 | 0.67 | 0.55 | 0.14 | 99.92 |
| 50 | 12.79 | 0.57 | 0.74 | 0.77 | 0.69 | 0.11 | 99.90 |
| 60 | 12.86 | 1.34 | 0.43 | 0.83 | 0.87 | 0.46 | 99.87 |
| 70 | 12.91 | 0.57 | 0.56 | 0.91 | 0.68 | 0.20 | 99.90 |
| 80 | 12.96 | 0.52 | 0.32 | 0.62 | 0.49 | 0.15 | 99.93 |
| 90 | 13.01 | 0.29 | 0.52 | 0.67 | 0.49 | 0.19 | 99.93 |
| 100 | 13.05 | 0.39 | 0.52 | 0.75 | 0.55 | 0.18 | 99.92 |
| 110 | 13.09 | 0.63 | 0.49 | 0.68 | 0.60 | 0.10 | 99.91 |
| 120 | 13.12 | 0.46 | 0.54 | 0.80 | 0.60 | 0.18 | 99.91 |
| 130 | 13.15 | 0.52 | 0.61 | 0.74 | 0.62 | 0.11 | 99.91 |
| 140 | 13.17 | 0.37 | 0.71 | 0.75 | 0.61 | 0.21 | 99.91 |
| 150 | 13.21 | 0.48 | 0.66 | 0.72 | 0.62 | 0.12 | 99.91 |

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1.2

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.22 | 693.20 | 595.10 | 650.00 | 646.10 | 40.14 | 0.00 |
| 5 | 4.79 | 646.80 | 554.60 | 547.00 | 582.80 | 45.36 | 9.80 |
| 10 | 9.34 | 75.03 | 112.70 | 92.68 | 93.47 | 15.39 | 85.53 |
| 15 | 12.24 | 0.58 | 0.67 | 0.54 | 0.60 | 0.05 | 99.91 |
| 20 | 12.73 | 0.13 | 0.50 | 0.47 | 0.37 | 0.17 | 99.94 |
| 30 | 12.79 | 0.24 | 0.72 | 0.52 | 0.49 | 0.20 | 99.92 |
| 40 | 12.88 | 0.20 | 0.66 | 0.48 | 0.45 | 0.19 | 99.93 |
| 50 | 12.93 | 0.25 | 0.56 | 0.43 | 0.41 | 0.13 | 99.94 |
| 60 | 12.97 | 0.20 | 0.64 | 0.68 | 0.51 | 0.22 | 99.92 |
| 70 | 13.01 | 0.10 | 0.58 | 0.68 | 0.45 | 0.25 | 99.93 |
| 80 | 13.06 | 0.40 | 0.57 | 0.17 | 0.38 | 0.16 | 99.94 |
| 90 | 13.09 | 0.20 | 0.65 | 0.59 | 0.48 | 0.20 | 99.93 |
| 100 | 13.12 | 0.27 | 0.89 | 0.61 | 0.59 | 0.25 | 99.91 |
| 110 | 13.15 | 0.56 | 0.64 | 0.52 | 0.57 | 0.05 | 99.91 |
| 120 | 13.19 | 0.20 | 0.61 | 0.57 | 0.46 | 0.18 | 99.93 |
| 130 | 13.21 | 0.16 | 0.62 | 0.53 | 0.44 | 0.20 | 99.93 |
| 140 | 13.24 | 0.41 | 0.63 | 0.64 | 0.56 | 0.11 | 99.91 |
| 150 | 13.28 | 0.22 | 0.48 | 0.57 | 0.42 | 0.15 | 99.93 |

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยปรับค่าพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1.6

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.62 | 668.20 | 647.80 | 570.70 | 628.90 | 51.42 | 0.00 |
| 5 | 6.92 | 374.40 | 492.60 | 358.80 | 408.60 | 73.16 | 35.03 |
| 10 | 9.78 | 42.27 | 99.80 | 34.35 | 58.81 | 35.72 | 90.65 |
| 15 | 12.42 | 0.62 | 0.63 | 0.57 | 0.61 | 0.03 | 99.90 |
| 20 | 12.81 | 0.46 | 0.56 | 0.53 | 0.52 | 0.05 | 99.92 |
| 30 | 12.87 | 0.43 | 0.52 | 0.49 | 0.48 | 0.04 | 99.92 |
| 40 | 12.93 | 0.42 | 0.52 | 0.47 | 0.47 | 0.05 | 99.93 |
| 50 | 12.99 | 0.37 | 0.51 | 0.42 | 0.43 | 0.07 | 99.93 |
| 60 | 13.03 | 0.36 | 0.43 | 0.34 | 0.38 | 0.04 | 99.94 |

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยความเข้มข้น นิกเกิลเริ่มต้นเป็น 1011.9 มิลลิกรัมต่อลิตร

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|---------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.20 | 1004.60 | 1037.70 | 993.50 | 1011.93 | 22.99 | 0.00 |
| 5 | 5.52 | 872.10 | 787.50 | 918.60 | 859.40 | 66.47 | 15.07 |
| 10 | 9.19 | 95.70 | 83.50 | 104.00 | 94.40 | 10.31 | 90.67 |
| 15 | 12.20 | 0.59 | 0.54 | 0.56 | 0.56 | 0.03 | 99.94 |
| 20 | 12.74 | 0.51 | 0.52 | 0.57 | 0.53 | 0.03 | 99.95 |
| 30 | 12.83 | 0.42 | 0.40 | 0.51 | 0.44 | 0.06 | 99.96 |
| 40 | 12.90 | 0.33 | 0.37 | 0.47 | 0.39 | 0.07 | 99.96 |
| 50 | 12.95 | 0.39 | 0.56 | 0.38 | 0.44 | 0.10 | 99.96 |
| 60 | 13.00 | 0.35 | 0.36 | 0.27 | 0.32 | 0.05 | 99.97 |

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นเป็น 646.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.22 | 693.20 | 595.10 | 650.00 | 646.10 | 40.14 | 0.00 |
| 5 | 4.79 | 646.80 | 554.60 | 547.00 | 582.80 | 45.36 | 9.80 |
| 10 | 9.34 | 75.03 | 112.70 | 92.68 | 93.47 | 15.39 | 85.53 |
| 15 | 12.24 | 0.58 | 0.67 | 0.54 | 0.60 | 0.05 | 99.91 |
| 20 | 12.73 | 0.13 | 0.50 | 0.47 | 0.37 | 0.17 | 99.94 |
| 30 | 12.79 | 0.24 | 0.72 | 0.52 | 0.49 | 0.20 | 99.92 |
| 40 | 12.88 | 0.20 | 0.66 | 0.48 | 0.45 | 0.19 | 99.93 |
| 50 | 12.93 | 0.25 | 0.56 | 0.43 | 0.41 | 0.13 | 99.94 |
| 60 | 12.97 | 0.20 | 0.64 | 0.68 | 0.51 | 0.22 | 99.92 |

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นเป็น 510.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.21 | 486.00 | 518.90 | 525.2 | 510.03 | 21.05 | 0.00 |
| 5 | 5.6 | 404.20 | 420.40 | 447.9 | 424.17 | 22.09 | 16.83 |
| 10 | 9.74 | 53.80 | 22.82 | 56.72 | 44.45 | 18.79 | 91.29 |
| 15 | 12.36 | 0.43 | 0.53 | 0.743 | 0.57 | 0.16 | 99.89 |
| 20 | 12.69 | 0.70 | 0.38 | 0.659 | 0.58 | 0.18 | 99.89 |
| 30 | 12.73 | 0.51 | 0.54 | 0.511 | 0.52 | 0.02 | 99.90 |
| 40 | 12.8 | 0.41 | 0.48 | 0.474 | 0.45 | 0.04 | 99.91 |
| 50 | 12.84 | 0.58 | 0.95 | 0.652 | 0.73 | 0.20 | 99.86 |
| 60 | 12.93 | 0.66 | 0.65 | 0.56 | 0.62 | 0.05 | 99.88 |

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นเป็น 253.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.2 | 233.90 | 269.90 | 256.80 | 253.53 | 18.22 | 0.00 |
| 5 | 7.63 | 110.20 | 155.92 | 125.18 | 130.43 | 23.31 | 48.55 |
| 10 | 12.39 | 0.25 | 0.16 | 0.42 | 0.28 | 0.13 | 99.89 |
| 15 | 12.74 | 0.40 | 0.32 | 0.28 | 0.33 | 0.06 | 99.87 |
| 20 | 12.9 | 0.31 | 0.20 | 0.34 | 0.28 | 0.08 | 99.89 |
| 30 | 12.95 | 0.45 | 0.25 | 0.36 | 0.35 | 0.10 | 99.86 |
| 40 | 12.98 | 0.52 | 0.24 | 0.24 | 0.33 | 0.16 | 99.87 |
| 50 | 13.02 | 0.49 | 0.42 | 0.38 | 0.43 | 0.06 | 99.83 |
| 60 | 13.04 | 0.19 | 0.22 | 0.33 | 0.25 | 0.07 | 99.90 |

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยอัตราส่วนโมล Ni^{2+} : DMG เป็น 1:0

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.22 | 693.20 | 595.10 | 650.00 | 646.10 | 40.14 | 0.00 |
| 5 | 4.79 | 646.80 | 554.60 | 547.00 | 582.80 | 45.36 | 9.80 |
| 10 | 9.34 | 75.03 | 112.70 | 92.68 | 93.47 | 15.39 | 85.53 |
| 15 | 12.24 | 0.58 | 0.67 | 0.54 | 0.60 | 0.05 | 99.91 |
| 20 | 12.73 | 0.13 | 0.50 | 0.47 | 0.37 | 0.17 | 99.94 |
| 30 | 12.79 | 0.24 | 0.72 | 0.52 | 0.49 | 0.20 | 99.92 |
| 40 | 12.88 | 0.20 | 0.66 | 0.48 | 0.45 | 0.19 | 99.93 |
| 50 | 12.93 | 0.25 | 0.56 | 0.43 | 0.41 | 0.13 | 99.94 |
| 60 | 12.97 | 0.20 | 0.64 | 0.68 | 0.51 | 0.22 | 99.92 |

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยอัตราส่วนโมล Ni^{2+} : DMG เป็น 1:0.65

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.20 | 575.90 | 620.70 | 551.60 | 582.73 | 35.05 | 0.00 |
| 5 | 5.73 | 335.00 | 277.40 | 312.30 | 308.23 | 29.01 | 47.11 |
| 10 | 9.76 | 53.29 | 15.60 | 34.06 | 34.32 | 18.85 | 94.11 |
| 15 | 12.58 | 20.01 | 12.26 | 16.30 | 16.19 | 3.88 | 97.22 |
| 20 | 12.86 | 18.20 | 13.62 | 18.36 | 16.73 | 2.69 | 97.13 |
| 30 | 12.97 | 23.93 | 15.33 | 21.42 | 20.23 | 4.42 | 96.53 |
| 40 | 12.85 | 19.95 | 22.21 | 20.40 | 20.85 | 1.20 | 96.42 |

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยอัตราส่วนโมล Ni^{2+} : DMG เป็น 1:1.3

| เวลา (นาท) | pH | ความเข้มข้นนิกเกิล (mg/L) | | | | SD | % Remove |
|---------------|-------|---------------------------|------------|------------|--------|-------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | | |
| 0 | 1.21 | 598.70 | 576.40 | 606.70 | 593.93 | 15.70 | 0.00 |
| 5 | 7.76 | 207.50 | 221.70 | 234.20 | 221.13 | 13.36 | 62.77 |
| 10 | 11.67 | 7.45 | 9.68 | 6.69 | 7.94 | 1.55 | 98.66 |
| 15 | 12.63 | 25.35 | 32.93 | 24.41 | 27.56 | 4.67 | 95.36 |
| 20 | 12.93 | 39.44 | 54.38 | 35.93 | 43.25 | 9.80 | 92.72 |
| 30 | 13.00 | 52.66 | 62.69 | 45.82 | 53.72 | 8.49 | 90.95 |
| 40 | 13.02 | 53.82 | 64.32 | 56.80 | 58.31 | 5.41 | 90.18 |

ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข.1 การคำนวณสารเคมีที่ใส่เติมในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี

ข.1.1 การคำนวณสารเคมีในน้ำเสียจริงสำหรับการศึกษาความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้น

1. เพิ่มความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นในน้ำเสียเป็น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นหลังจากปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1.2 มีค่า 646 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นต้องเพิ่ม Ni^{2+} อีก 354 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{Ni}^{2+} \ 58.69 \times 10^3 \text{ mg} \text{ มาจากการชั่ง } \text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 262.84 \times 10^3 \text{ mg} \\ \text{ดังนั้น } \text{Ni}^{2+} \ 354 \text{ mg} \text{ มาจากการชั่ง } \text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \frac{262.84 \times 10^3 \times 354}{58.69 \times 10^3} \text{ mg} \\ &= 1585 \text{ mg} \\ &= 1.585 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องชั่ง $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.585 g ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร แต่เนื่องจากน้ำเสียมีปริมาตร 170 มิลลิลิตร จึงต้องชั่ง $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.269 กรัม ละลายลงในน้ำเสีย

2. ตัวอย่างการเจือจางความเข้มข้นนิเกิลในน้ำเสีย

ในที่นี้จะนำตัวอย่างการเจือจางน้ำเสียให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณ

$$N_1V_1 = N_2V_2$$

| | | | |
|-----|-------|---|---------------------------------|
| โดย | N_1 | = | ความเข้มข้นสารละลายที่จะปรับค่า |
| | N_2 | = | ความเข้มข้นสารละลายที่ต้องการ |
| | V_1 | = | ปริมาตรสารละลายที่จะปรับค่า |
| | V_2 | = | ปริมาตรสารละลายที่ต้องการ |

$$\begin{aligned}
 646 \text{ mg/L} \times V_1 &= 500 \text{ mg/L} \times 170 \text{ mL} \\
 V_1 &= \frac{500 \times 170}{646} \text{ mL} \\
 V_1 &= 132 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น นำน้ำเสียความเข้มข้นนิกเกิล 646 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 132 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเป็น 170 มิลลิลิตร และปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1.2 จากนั้นเติม NaCl เพื่อคงปริมาณ Cl^- ก่อนและหลังการเจือจางน้ำเสียให้มีค่าใกล้เคียงกัน โดย Cl^- ก่อนทำการเจือจางน้ำเสียจริงมีค่า 59,018 มิลลิกรัมต่อลิตร และ Cl^- หลังทำการเจือจางน้ำเสียจริงมีค่า 45,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นต้องเติม Cl^- เพิ่มอีก 14,018 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในสารละลายปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ต้องเติม Cl^- 14,018 มิลลิกรัม ดังนั้นในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี 170 มิลลิลิตร ต้องเติม Cl^- 2.3831 กรัม

$$\text{Cl}^- 35.5 \text{ g} \text{ มาจาก NaCl} = 58.44 \text{ g}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } \text{Cl}^- 2.3821 \text{ g} \text{ จะมาจาก NaCl} &= \frac{58.44 \times 2.3831}{35.5} \text{ g} = 3.9231 \text{ g}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงต้องละลาย NaCl 3.9231 กรัม ลงในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี 170 มิลลิลิตร ที่ได้เจือจางไว้แล้ว

ข.1.2 การคำนวณสารเคมีในน้ำเสียจริงสำหรับการศึกษาความเข้มข้น DMG เริ่มต้น

ในที่นี้จะนำตัวอย่างการเตรียมน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีให้มีค่าอัตราส่วนของนิกเกิลต่อ DMG เป็น 1:0.65 โดยโมล มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \frac{\text{จำนวนโมล Ni}^{2+}}{\text{จำนวนโมล DMG}} &= \frac{1}{0.65} \\
 \text{จำนวนโมล DMG} &= 0.65 \times \frac{(646 \times 10^{-3}) \text{ g/L}}{58.69 \text{ g/mol}} \\
 &= 7.16 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \\
 &= 7.16 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \times 116.12 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

$$= 0.8 \text{ g/L}$$

ดังนั้นต้องเติม DMG 0.8 g สำหรับน้ำเสีย 1 ลิตร แต่เนื่องจากน้ำเสียมีปริมาตร 170 มิลลิลิตร จึงต้องเติม DMG 0.14 กรัม ลงในน้ำเสีย

ข.2 วิธีคำนวณอัตราเร็วในการกำจัดนิเกิล

ในที่นี้จะนำตัวอย่างการคำนวณอัตราเร็วในการกำจัดนิเกิลเมื่อความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นเป็น 1012 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณ

อัตราเร็วในการกำจัดนิเกิล

$$= \frac{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดได้ (\mu\text{mol})}}{\text{ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบในเซลล์เคมีไฟฟ้า (Amp \times s)}}$$

$$= \frac{(1012-1) \text{ mg}}{\text{L}} \times 170 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{10^6 \mu\text{mol}}{1 \text{ mol}}$$

$$= \frac{58.69 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 5.5 \text{ Amp} \times 14 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}}{1 \text{ mol}} \times \frac{10^6 \mu\text{mol}}{1 \text{ mol}}$$

$$= 0.6339 \mu\text{mol} \cdot \text{Amp}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

ดังนั้นอัตราเร็วในการกำจัดนิเกิลเมื่อความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นเป็น 1012 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า $0.6339 \mu\text{mol} \cdot \text{Amp}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ สำหรับน้ำเสียปริมาตร 170 มิลลิลิตร

ข.3 วิธีคำนวณร้อยละการกำจัด (% Removal)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(W_i - W_t) \times 100\%}{W_i}$$

W_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

W_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ในที่นี้ จะนำความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี ในการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1.2 ที่เวลา 10 และ 15 นาที มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัด เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเป็น 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นในน้ำเสียจริง 646 มิลลิกรัมต่อลิตร

ณ เวลา 10 นาที หลังการกำจัดความเข้มข้นของนิเกิลลดลงเหลือ 94 มิลลิกรัมต่อลิตร

ณ เวลา 15 นาที หลังการกำจัดความเข้มข้นของนิเกิลลดลงเหลือ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\% \text{ Removal} = \frac{(W_i - W_t) \times 100\%}{W_i}$$

แทนค่า ที่เวลา 10 นาที

$$= \frac{(646 - 94) \times 100\%}{646}$$

$$= 85.5 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 10 นาที ร้อยละการกำจัดนิเกิล คือ 85.5%

แทนค่า ที่เวลา 15 นาที

$$= \frac{(646 - 0.6) \times 100\%}{646}$$

$$= 99.9 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 15 นาที ร้อยละการกำจัดนิเกิล คือ 99.9 %

ข.4 วิธีคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\
 &= 4 \text{ เซนติเมตร} \times 9 \text{ เซนติเมตร} \times 2 \text{ ด้าน} \times 2 \text{ แผ่น} \\
 &= 144 \text{ ตารางเซนติเมตร} \\
 &= 0.0144 \text{ ตารางเมตร}
 \end{aligned}$$

ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 5.5 แอมแปร์

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} &= \frac{\text{กระแสไฟฟ้า}}{\text{พื้นที่ขั้วแคโทด}} \\
 &= \frac{5.5 \text{ A}}{0.0144 \text{ m}^2} \\
 &= 382 \text{ A/m}^2
 \end{aligned}$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า 5.5 แอมแปร์ มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 382 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 1 แอมแปร์

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} &= \frac{1 \text{ A}}{0.0144 \text{ m}^2} \\
 &= 69 \text{ A/m}^2
 \end{aligned}$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอภิรุจี บัวดก เกิดเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนศรีอยุธยา ในพระอุปถัมภ์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปีการศึกษา 2550 จากนั้น สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในการประชุมสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 14 จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย ที่โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่ ณ วันที่ 27 พฤษภาคม 2558



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY