

การนำกลับดีบุกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี



นางสาว อภิรดี สุนทรภา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

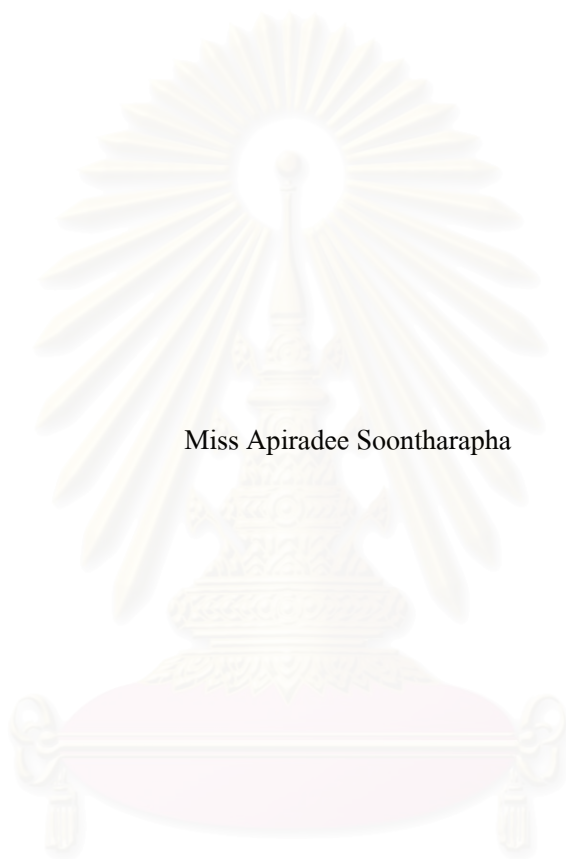
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF TIN FROM WASTEWATER USING CHEMICAL PRECIPITATION AND  
ELECTROCHEMICAL PROCESS



Miss Apiradee Soontharapha

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
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 2006


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี  
และวิธีทางไฟฟ้าเคมี  
โดย นางสาว อภิรดี สุนทรภา  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรรักษ์ โอสถาพันธุ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์

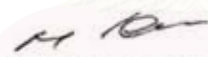
---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... หนบตคณบวศวงศร  
(ศาสตราจารย์ ดร.คิเรก ลาวัณย์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ชาวเชียร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรรักษ์ โอสถาพันธุ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ถักขันธ์ ทัิ้งรัมย์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. พิสุทธ์ เพ็ชรมนกุล)

อภิรดี สุนทรามา : การนำกลับคืนจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี. (RECOVERY OF TIN FROM WASTEWATER USING CHEMICAL PRECIPITATION AND ELECTROCHEMICAL PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. เขมรรฐ โอสถาพันธุ อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์, 124 หน้า.

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การประยุกต์ใช้การตกตะกอนทางเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ และวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง เพื่อการนำกลับของดีบุก ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร เนื่องจากเหตุผลทางสิ่งแวดล้อมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งโซเดียมซัลไฟด์มีความเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร ส่วนที่ 2 วิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้ 2 ชุดการทดลอง นั่นคือ ชุดที่ 1 ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด คือ แกรไฟต์ ชุดที่ 2 ขั้วแอโนด คือ แกรไฟต์ ขั้วแคโทด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 2000 และ 4000 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $3.25 \times 12$  ตารางเซนติเมตร และ  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อเลือกค่าที่มีสภาวะเหมาะสมที่สุดในการนำกลับดีบุก ส่วนที่ 3 ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2 มาใช้กับน้ำเสียจริง

ผลการทดลองส่วนที่ 1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอช 3 นำกลับดีบุกได้ 56.03% ส่วนการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ พีเอช 2 นำกลับดีบุกได้ 79.68%

ผลการทดลองส่วนที่ 2 ค่ากระแสไฟฟ้า พื้นที่ขั้วไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้า และชนิดขั้วไฟฟ้าที่นำกลับดีบุกในสภาวะเหมาะสมที่สุด คือ 500 มิลลิแอมแปร์  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร 5 เซนติเมตร และใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม ให้ค่าการนำกลับดีบุกได้ 100%

ผลการทดลองส่วนที่ 3 การทดลองทางไฟฟ้าเคมีของน้ำเสียจริง ให้ค่าการนำกลับดีบุก 86.86% ค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าเคมีมีค่าสูงกว่าการตกตะกอน แต่การนำกลับดีบุกด้วยไฟฟ้านั้นจะให้ดีบุกบริสุทธิ์ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต.....อ.อ.อ. อ.สุนทรามา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4870634221 : MAJOR Environmental Engineering

KEY WORD: Recovery / Tin / Wastewater / Chemical Precipitation / Electrochemical

APIRADEE SOONTHARAPHA: RECOVERY OF TIN FROM WASTEWATER USING CHEMICAL PRECIPITATION AND ELECTROCHEMICAL PROCESS. THESIS ADVISOR:ASSIST.PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSIST.PROF.PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D.,124 pp.

The purpose of this study is to apply chemical precipitation and electrochemical process to recover Tin from synthetic and real wastewater. This work is divided into three sections. The first section is to recover Tin by using chemical precipitation with Sodium Hydroxide and Sodium Sulfide. The second section is to recover Tin by electrochemical process with two types of electrode: graphite and stainless steel. Eight current levels are applied: 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 2000 and 4000mA. The effect of electrode area and space are also investigated with  $3.25 \times 12 \text{ cm}^2$  and  $6.5 \times 12 \text{ cm}^2$  in area, and 5 cm and 10 cm in electrode space. Then, the optimum current, area of electrode, space of electrode and type of cathode electrode is applied with the real wastewater.

The result of first section: With initial Tin concentration of 0.01 M, the optimum pH for precipitation by Sodium Hydroxide and Sodium Sulfide are 3 and 2 , in which approximate 56% and 80% of Tin recovered.

The result of second section shows that 100% of Tin can be recovered from synthetic wastewater by electrochemical process at these following optimum conditions: current at 500mA, area of electrode of  $6.5 \times 12 \text{ cm}^2$ , space of electrode at 5 cm and the stainless steel cathode with the operation time of 6 hours.

The result of last section shows that 87% of Tin can be recovered from the real wastewater by electrochemical process. It is found that cost of electrochemical process is more expensive than chemical precipitation, but the electrochemical process provides a pure Tin metal, which is also less toxic to the environment.

Department Environmental Engineering  
Field of study Environmental Engineering  
Academic year 2006

Student's signature... *Apiradee Soontharapha*  
Advisor's signature... *K. Osathaphan*  
Co-advisor's signature... *Pichaya Rachdawong*

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดียิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองและตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียร ผศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์ และ อ.ดร.พิศุทธิ์ เพ็ชรมนกุล ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย และห้อง OECF จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยต่างๆ ได้แก่ ทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมือวัดปริมาณโลหะหนักโดยไม่คิดค่าใช้จ่าย

ขอขอบพระคุณ คุณ โสภภาพ พี่ตุ้ม เจ้าของโรงงานและผู้จัดการ โรงงานที่อนุเคราะห์น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง และ คุณ ชานินทร์ ที่ให้แอมป์ไฟต์ โดยไม่คิดค่าใช้จ่าย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ จันทวรรณ ดันเจริญ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัย ขอขอบคุณ พี่ไธด์ พี่จ๊อก พี่เอมมา พี่เอท มิน บิ๊ก ที่ได้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ มากมาย และขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคน

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ ปะป๊า มะม๊า เป็นอย่างสูงที่ให้ช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจ ซึ่งทำให้สามารถฟันฝ่าปัญหาต่างๆ มาได้โดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ดินบุก.....	5
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินบุก.....	5
2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของดินบุก.....	9
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนัก.....	10
2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี.....	11
2.2.1.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์.....	12
2.2.1.2 การตกตะกอนซัลไฟด์.....	14
2.2.1.3 การตกตะกอนคาร์บอเนต.....	15
2.2.1.4 การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์.....	15
2.2.1.5 ความสามารถในการละลาย.....	16
2.2.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน.....	20
2.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	20
2.2.4 อิเล็กโทรไลซิส.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง.....	21
2.2.6 ออสโมซิสผันกลับ.....	21
2.2.7 การดูดซับด้วยถ่าน.....	21
2.3 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี.....	22
2.3.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	23
2.3.2 โพลาริเซชัน.....	26
2.4 ขั้วไฟฟ้า.....	27
2.4.1 ไททาเนียม.....	27
2.4.2 แพลทินัม.....	27
2.4.3 เหล็ก.....	28
2.4.4 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	28
2.4.5 อะลูมิเนียม.....	29
2.4.6 แกรไฟต์.....	29
2.5 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	29
2.5.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ( $E^\circ$ ).....	30
2.5.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ ( $E_R$ ).....	30
2.5.3 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน ( $E_p, \eta$ ).....	31
2.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า.....	31
2.6.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน.....	32
2.6.2 ค่าความนำไฟฟ้า.....	32
2.6.3 กำลังไฟฟ้า.....	33
2.7 อิเล็กโทรแกรมเมตรี.....	33
2.7.1 การแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า.....	33
2.7.2 การพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า.....	34
2.8 เทคนิควิธีวิเคราะห์อิเล็กโทรแกรมเมตรี.....	34
2.8.1 อิเล็กโทรแกรมเมตรีแบบกระแสคงที่.....	34
2.8.2 อิเล็กโทรแกรมเมตรีแบบควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	35
2.9 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า.....	37



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 ประสิทธิภาพเชิงกระแส.....	37
2.11 ปัจจัยที่ต้องควบคุมของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	38
2.12 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี.....	45
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	45
3.1.2 สารเคมี.....	46
3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง.....	46
3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	46
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	47
3.2.1 การทดลองการตกตะกอนดีบุก.....	48
3.2.2 การทดลองโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการนำกลับของดีบุก.....	50
3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์.....	56
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์</b>	
4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี.....	57
4.1.1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	57
4.1.2 การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	58
4.1.3 เปรียบเทียบความสามารถในการละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์.....	59
4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำกลับดีบุก ของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	61
4.2.1 การทดลองหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	61
4.2.2 การทดลองหาขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	67
4.2.3 การทดลองหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	70
4.2.4 สรุปผลการทดลองทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์.....	70
4.2.5 ความนำไฟฟ้า.....	71

**สารบัญ (ต่อ)**

	หน้า
4.3 การทดลองที่ 3 การนำกลับตึบของน้ำเสียจริงด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	73
4.3.1 คุณสมบัติของน้ำเสีย.....	73
4.3.2 ผลการนำกลับตึบเมื่อใช้น้ำเสียจริง.....	74
4.3.3 ความนำไฟฟ้า.....	78
4.3.4 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	78
4.3.4.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี.....	78
4.3.4.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเคมี.....	78
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม.....	82
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>83</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	87
ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ.....	118
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>124</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดีบุก.....7
2.2	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดีบุกที่แปรตามอุณหภูมิ.....8
2.3	แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของดีบุก..... 8
2.4	แสดงไอโซโทปของดีบุก.....9
2.5	ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ..... 13
2.6	เปรียบเทียบการตกตะกอนแบบต่างๆ.....17
2.7	ค่าคงที่ของการละลาย..... 18
3.1	ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอนดีบุก ด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์..... 49
3.2	ตัวแปรในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า พื้นที่ขั้วไฟฟ้าและระยะห่างขั้วไฟฟ้า ที่มีผลต่อการนำกลับดีบุกเมื่อใช้แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด..... 52
3.3	แสดงมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด.....56
4.1	เปรียบเทียบการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์..... 61
4.2	แสดงร้อยละการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ และค่าประสิทธิภาพเชิง กระแส เมื่อใช้ขั้วแกรไฟต์และขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด.....66
4.3	แสดงร้อยละการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ขนาดและพื้นที่ต่างๆ.....71
4.4	คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง..... 73
4.5	ผลเปรียบเทียบการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียจริงและค่าทางทฤษฎี..... 77
ก.1	ผลการทดลองการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 88
ก.2	ผลการทดลองการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....89
ก.3	เปรียบเทียบการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์..... 90
ก.4	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 100mA ขั้วแกรไฟต์.....91
ก.5	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 150mA ขั้วแกรไฟต์.....92
ก.6	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 200mA ขั้วแกรไฟต์.....93
ก.7	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 250mA ขั้วแกรไฟต์.....94
ก.8	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 500mA ขั้วแกรไฟต์.....95
ก.9	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 1000mA ขั้วแกรไฟต์.....96
ก.10	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 2000mA ขั้วแกรไฟต์.....97
ก.11	ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 4000mA ขั้วแกรไฟต์.....98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.12 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 100mA ขั้ว St304.....	99
ก.13 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 150mA ขั้ว St304.....	100
ก.14 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 200mA ขั้ว St304.....	101
ก.15 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 250mA ขั้ว St304.....	102
ก.16 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 500mA ขั้ว St304.....	103
ก.17 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 1000mA ขั้ว St304.....	104
ก.18 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 2000mA ขั้ว St304.....	105
ก.19 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแส 4000mA ขั้ว St304.....	106
ก.20 ผลการหาค่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้วแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้า 500mA ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 10 ซม. และพื้นที่ขั้ว $6.5 \times 12 \text{ ซม.}^2$ .....	107
ก.21 ผลการหาค่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้ว St304 กระแสไฟฟ้า 500mA ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 10 ซม. และพื้นที่ขั้ว $6.5 \times 12 \text{ ซม.}^2$ .....	108
ก.22 ผลการหาค่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้วแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้า 500mA ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 ซม. และพื้นที่ขั้ว $3.25 \times 12 \text{ ซม.}^2$ .....	109
ก.23 ผลการหาค่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้ว St304 กระแสไฟฟ้า 500mA ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 ซม. และพื้นที่ขั้ว $3.25 \times 12 \text{ ซม.}^2$ .....	110
ก.24 ผลการทดลองการนำกลับคืนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เมื่อน้ำเสียจริง ขั้ว St304 .....	111
ก.25 ผลเปรียบเทียบการนำกลับคืนในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง.....	112
ก.26 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการทดลองด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด และทำการเจือจาง 10 เท่า.....	113
ก.27 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการทดลองด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี St 304 เป็นขั้วแคโทด และทำการเจือจาง 10 เท่า.....	115
ก.28 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียจริง เมื่อทำการทดลองด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี St304 เป็นขั้วแคโทด และทำการเจือจาง 10 เท่า.....	117

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างอะตอมของดีบุก.....	6
2.2	ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์.....	14
2.3	ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์.....	15
2.4	การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย.....	22
2.5	การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยมีรอยต่อของสารละลาย.....	23
2.6	รูปแบบแสดงกระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า.....	24
2.7	ตัวอย่างการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก.....	25
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อควบคุมกระแสคงที่.....	35
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	36
3.1	ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.2	อุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	47
3.3	แผนผังแสดงภาพรวมของการทำวิจัย.....	48
3.4	แผนผังแสดงการตกตะกอนดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์.....	50
3.5	แผนผังแสดงการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	54
3.6	แผนผังแสดงการทดลองหาพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	54
3.7	แผนผังแสดงการทดลองหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	55
3.8	แผนผังแสดงการทดลอง โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของน้ำเสียจริง.....	55
4.1	ผลการตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	58
4.2	ผลการตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	59
4.3	กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์.....	60
4.4	ค่าความเข้มข้นของสารละลายดีบุกเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้แกรไฟต์ เป็นขั้วแคโทด....	62
4.5	ค่าความเข้มข้นของสารละลายดีบุกเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้ S1304 เป็นขั้วแคโทด.....	62
4.6	ค่าร้อยละการนำกลับดีบุกเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้แกรไฟต์ เป็นขั้วแคโทด.....	63
4.7	ค่าร้อยละการนำกลับดีบุกเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้ S1304 เป็นขั้วแคโทด.....	63
4.8	กราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงกระแสและเวลา เมื่อใช้แกรไฟต์ เป็นขั้วแคโทด.....	65
4.9	กราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงกระแสและเวลา เมื่อใช้ S1304 เป็นขั้วแคโทด.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	กราฟแสดงความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและพื้นที่ ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เมื่อใช้แกรไฟต์ เป็นขั้วแคโทด..... 67
4.11	กราฟแสดงความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและพื้นที่ ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ St304 เป็นขั้วแคโทด..... 68
4.12	ค่าร้อยละการนำกลับคืนเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและระยะห่างต่างๆ เมื่อใช้แกรไฟต์ เป็นขั้วแคโทด.....69
4.13	ค่าร้อยละการนำกลับคืนเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและระยะห่างต่างๆ เมื่อใช้ St 304 เป็นขั้วแคโทด..... 69
4.14	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์..... 71
4.15	รูปน้ำเสียที่เก็บจากระบบบำบัดอากาศ..... 74
4.16	กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นดินุกับเวลา เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง..... 75
4.17	กราฟเปรียบเทียบร้อยละการนำกลับคืน เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง..... 75
4.18	กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง... 76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แร่เป็นทรัพยากรที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีความสำคัญและมีบทบาทที่สนองความต้องการทางด้านปัจจัยต่างๆ ของประชากร ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและพลังงาน ความสำคัญและประโยชน์ของแร่ธาตุที่จะนำมาใช้ขึ้นอยู่กับระยะเวลา ความเจริญทางเทคโนโลยี ตลอดจนความต้องการในการนำไปใช้ของมนุษย์ ทรัพยากรแร่ธาตุที่มนุษย์เราใช้ส่วนใหญ่มาจากแผ่นดิน ซึ่งค่อยๆ ลดจำนวนลง จึงควรที่จะมีการอนุรักษ์แร่ธาตุ โดยมีมาตรการที่สำคัญคือ การใช้แร่ธาตุอย่างประหยัด การใช้แร่ชนิดอื่นทดแทนแร่ที่ใช้กันมาก และนำแร่ที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีกเพื่อการใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่

ปัจจุบันนี้ ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น บางอุตสาหกรรมมีการใช้แร่โลหะที่สำคัญในประเทศ อาทิเช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ และโรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้า เป็นต้น โรงงานเหล่านี้ได้ปล่อยน้ำเสียจำนวนมาก ส่งผลให้แหล่งน้ำมีคุณภาพที่เสื่อมโทรมลง โรงงานบางแห่งมีโลหะหนักที่เหลือออกจากกระบวนการผลิต เช่น โครเมียม ทองแดง สังกะสีและดีบุก เป็นต้น

การตระหนักถึงการลดปริมาณหรือการจัดการน้ำเสียที่มีโลหะต่างๆ โดยที่น้ำเสียบางชนิดประกอบด้วยโลหะที่มีค่า เป็นที่น่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์ มีหลายวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้น เช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) วิธีเหล่านี้ไม่สะดวกและค่าใช้จ่ายสูง (Garcia-Gabaldon และคณะ, 2006) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อนำมาใช้ก็ต้องกำจัดสารปนเปื้อนที่ไม่ต้องการออกไปก่อน การสกัดด้วยตัวทำละลายก็ต้องใช้สารเคมีจำนวนมาก หากมีโลหะที่ต้องการนำกลับมาใช้ใหม่จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง เป็นต้น ส่วนวิธีการตกตะกอนเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูกและรวดเร็ว วิธีทางไฟฟ้าเคมีก็เป็นวิธีที่ใช้กันมาก วิธีนี้สามารถกำจัดสารมลพิษได้ โดยไม่ต้องใช้สารเคมี อีกทั้งเป็นการบำบัดที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง (Scott และคณะ, 1997) นอกจากนี้โลหะที่กลับคืนมาจะอยู่ในรูปที่บริสุทธิ์ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความจำเพาะสูง จึงไม่มีการรบกวนหรือปะปนของสารที่ไม่ต้องการ ดังนั้นเพื่อที่จะนำโลหะที่มีค่ากลับมาใช้ใหม่จึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดทางเทคนิค ผลที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและในเชิงเศรษฐศาสตร์

ทรัพยากรธรรมชาติที่สนใจในงานวิจัยนี้คือดีบุก เนื่องจากประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตดีบุกที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก และเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีคุณค่ามาก เนื่องจาก ดีบุกเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตกระป๋อง ซึ่งใช้ดีบุกในการเคลือบโลหะ การทำโลหะบัดกรีซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่ว อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น จึงเป็นสิ่งที่สมควรอย่างยิ่งที่จะศึกษาถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ของแร่ดีบุก เพื่อที่จะลดการขุดทรัพยากร โดยมีการพัฒนากระบวนการนำกลับดีบุกให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และลดการปนเปื้อนให้น้อยที่สุด เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายสำหรับการประกอบอุตสาหกรรมในด้านนี้

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี เพื่อแยกเอาโลหะดีบุกออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกเอาโลหะดีบุกออกจากน้ำเสียจริง การตกตะกอนทางเคมีจะใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และ โซเดียมซัลไฟด์ โดยศึกษาพีเอชที่มีความเหมาะสมในการตกตะกอน สำหรับวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อการนำดีบุกกลับมาใช้ใหม่ ตัวแปรที่พิจารณาได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า พื้นที่ขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และชนิดของขั้วไฟฟ้า (แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม) โดยที่จะเลือกตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการนำกลับดีบุก โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อที่จะมาใช้ทำการทดลองกับน้ำเสียจริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เพื่อศึกษาค่าพีเอชที่มีความเหมาะสม ในการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมซัลไฟด์
2. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เพื่อศึกษาถึงค่ากระแสไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้าและชนิดของขั้วไฟฟ้า
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียจริง จากน้ำเสียในส่วนของระบบบำบัดอากาศแบบ Scrubber ของโรงงานโลหะบัดกรี โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม จากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่
  1. น้ำเสียสังเคราะห์โดย ดิบุกประจวบวถลี ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
  2. น้ำเสียในส่วนของระบบบำบัดอากาศแบบ Scrubber จากโรงงานโลหะบัดกรีแห่งหนึ่ง
2. งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 การทดลองหลัก

#### การทดลองที่ 1

1. ศึกษาความสามารถในการตกตะกอนดิบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความสามารถในการละลายที่พีเอชต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามความเหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าพีเอชที่ต้องการ
2. ศึกษาความสามารถในการตกตะกอนดิบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ความสามารถในการละลายที่พีเอชต่างๆ ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็น 11 จากนั้น ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมซัลไฟด์ 0.02 โมลต่อลิตร แล้วแปรเปลี่ยนค่าพีเอชในแต่ละชุดการทดลองโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นและปริมาณตามความเหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าพีเอชที่ต้องการ

#### การทดลองที่ 2

1. ทำการทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี 2 ชุด โดยแต่ละชุดมีลำดับการทดลองเช่นเดียวกัน ชุดที่ 1 ขั้วแอโนด คือ แกรไฟต์ ขั้วแคโทด คือ แกรไฟต์ ชุดที่ 2 ขั้วแอโนด คือ แกรไฟต์ ขั้วแคโทด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม
2. แปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 2000 และ 4000 มิลลิแอมป์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 6.5x12 ตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร เลือกค่ากระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการนำกลับดิบุก มาทำการทดลองต่อในข้อ 3
3. เลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในข้อ 2 แปรเปลี่ยนพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 3.25x12 ตารางเซนติเมตร และ 6.5x12 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร เลือกพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับดิบุกดีที่สุด มาทำการทดลองต่อในข้อที่ 4

4. เลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในข้อ 2 และขนาดขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในข้อ 3 แปรเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร

#### การทดลองที่ 3

ทำการทดลองกับน้ำเสียจริงด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า พื้นที่ขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและชนิดขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในชุดที่ 2 (น้ำเสียสังเคราะห์) เป็นค่าที่ใช้ในการทดลอง

3. ค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ในการทดลองที่ 1 ได้แก่ พีเอชและความเข้มข้นของดีบุก  
ค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ในการทดลองที่ 2 และ 3 ได้แก่ ความเข้มข้นของดีบุก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการ และแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการนำโลหะหนักในน้ำเสียที่เป็นปัญหาในปัจจุบันกลับมาใช้ใหม่
2. สามารถเลือกใช้ตัวตกตะกอนที่เหมาะสมในการตกตะกอนดีบุกให้มีประสิทธิภาพ
3. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้าเคมีในการนำโลหะมีค่าอื่นๆ ออกจากน้ำเสียโรงงานได้
4. สามารถหาแนวทางที่เหมาะสมต่อการนำกลับของดีบุก
5. เป็นแนวทางในการลดมลภาวะทางน้ำที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ดีบุก (Rochow และ Abel, 1973)

ดีบุกเป็นธาตุที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตดีบุกที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก และแร่ดีบุกนี้ส่วนใหญ่ได้จากบางจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศ เช่น จังหวัดภูเก็ต สงขลา พังงา ระนองและที่อำเภอตะกั่วป่า เป็นต้น ดีบุกนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ใช้ชุบแผ่นเหล็กกันสนิม ทำเป็นกระป๋อง ทำโลหะผสมสำหรับบัดกรี ทำฟิวส์ไฟฟ้า

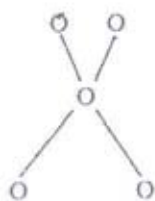
ดีบุกที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่อยู่ในรูปของดีบุกออกไซด์,  $\text{SnO}_2$ , ที่รู้จักในชื่อแคสซิเทอไรต์ (Cassiterite) และในบางโอกาสก็อาจพบโลหะดีบุกปนอยู่กับทองในธรรมชาติ

แหล่งผลิตดีบุกที่สำคัญ ได้แก่ ประเทศมาเลเซีย โบลิเวีย อินโดนีเซีย คองโก ไทยและไนจีเรีย

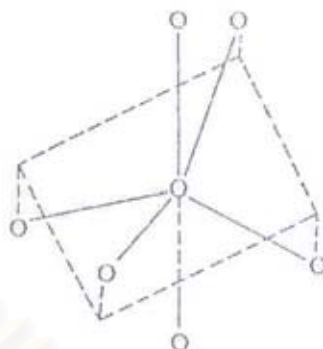
##### 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดีบุก

ดีบุกเมื่ออยู่ในรูปโลหะบริสุทธิ์มีสีขาวคล้ายเงิน แต่ในกรณีที่มีฟิล์มของออกไซด์เคลือบบนผิวอาจทำให้เป็นสีเหลืองทอง ดีบุกเป็นโลหะอ่อนดัดงอได้ มีจุดหลอมเหลวที่ 232 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำ เมื่อเทียบกับโลหะสำหรับก่อสร้างทั่วไป ขณะที่จุดเดือดสูงถึง 2,625 องศาเซลเซียส ซึ่งเกินกว่าจุดเดือดของโลหะเกือบทั้งหมด ยกเว้นทั้งสแตนและกลุ่มแพลทินัม

ดีบุกมีรูปแบบผลึกอยู่ 2 แบบ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 18 องศาเซลเซียส รูปแบบที่เสถียรคือแบบ  $\beta$  ฟอรัมหรือดีบุกขาว (White tin) และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 18 องศาเซลเซียส รูปแบบที่เสถียรคือแบบ  $\alpha$  ฟอรัมหรือดีบุกเทา (Gray tin) ในดีบุกเท่านั้นแต่ละอะตอมจะมี 4 พันธะโควาเลนต์ ก่อเป็นพันธะโควาเลนต์สามมิติตลอดทั่วทั้งผลึก ดีบุกรูปแบบนี้จะเป็นโครงสร้างเปรียบเสมือนรูปแบบเพชรของคาร์บอน ดังรูปที่ 2.1



(ก)



(ข)

- รูปที่ 2.1** (ก) โครงสร้างแบบเตตระฮีดรัลของอะตอมดีบุกในดีบุกเทา  
 (ข) โครงสร้างแบบออกตะฮีดรัลที่ผิดปกติของอะตอมดีบุกในดีบุกขาว (Rochow และ Abel, 1973)

ส่วนในดีบุกขาวนั้นแต่ละอะตอมจะมี 4 อะตอมที่อยู่ใกล้ระยะ 3.016 อังสตรอม ดังนั้นแทนที่จะเป็นเตตระฮีดรัล โคออร์ดิเนตแบบในดีบุกเทา ดีบุกขาวจึงมีแต่ละอะตอมในทรงออกตะฮีดรัลที่ผิดปกติ โลหะดีบุกที่ใช้งานทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบ  $\beta$  ฟอรัม (ดีบุกขาว) และถึงแม้ว่าอุณหภูมิเปลี่ยนรูปจากดีบุกขาวเป็นดีบุกเทา คือ 18 องศาเซลเซียส แต่จะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปจากดีบุกขาวเป็นดีบุกเทา ยกเว้นในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส

คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของดีบุกแสดงในตาราง 2.1, 2.2 และ 2.3

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดีบุก (Maykuth, 1983)

Property	Value	Property	Value	
Mp °C	231.9	Coefficient of linear expansion $\times 10^{-6}$		
Bp °C	2625		at 0°C	19.9
Sp gr		at 100°C	23.8	
$\alpha$ from gray tin	5.77	Shrinkage on solidification %	2.8	
$\beta$ from white tin	7.29	Resistivity of white tin $\alpha$ ohm.cm		
Liquid at mp	6.97		at 0°C	11
Transformation temp °C	18	at 100°C	15.5	
Vapor pressure at KPa		at 200°C	20	
	1000	$986 \times 10^{-6}$	at mp(solid)	22
	1300	1.1	at mp(liquid)	45
	1500	22.6	Volume conductivity %IACS	15
	2000	$4.08 \times 10^{-3}$	Brinell hardness 10 kg 5mm 180s	
2550	$91 \times 10^3$	at 20°C		3.9
Surface tension at mp mN/m	544	at 220°C	0.7	
Viscosity at mp mPa.s	1.85	Tensile strength, as cast Mpa		
Specific heat at 20°C W/(m.K)	222		at 15°C	14.5
Latent heat at fusion kJ/(g.atom)	7.08		at 200°C	4.5
Thermal conductivity at 20°C W/(m.K)	65		at -40°C	20
Latent heat at vaporization kJ/mol	296.4		at -120°C	87.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดีบุกที่แปรตามอุณหภูมิ (Wright, 1982)

Temperature °C	Density gcm <sup>-3</sup>	Thermal conductivity (cgs)	Surface tension dynes cm <sup>-1</sup>	Viscosity cP	Electrical conductivity ohm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> x10 <sup>6</sup>
-170		0.913			
0		0.15			
13	$\alpha$ 5.77				
18	$\beta$ 7.29				
100		0.145			15.5
200		0.135	685		20
232	7.17				22
232	6.97				45
250		0.078		2.71	
300	6.92			1.88	46.8
400	6.85			1.66	49
500	6.78		580	1.38	51.5
600	6.71		565	1.18	54
700			550	1.05	56.3
800	6.57		535	0.95	58.7
900			520	0.87	61.2

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของดีบุก (Wright, 1982)

State or transition	(cal/mol)	(cal/mol/K)
$\alpha$ (grey)	470	10.55
Transition 13°C	500	1.75
$\beta$ (white) standard state	0	12.24
$C_p = 5.16 + 0.0043T$		
Fusion 232°C	1690	3.35
Liquid		
$C_p = 8.29 - 0.0022T$		
$\log p_{\text{mm hg}} = 8.23 - 15500T^{-1}$		
Boiling 2623°C	70800	24.45

### 2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของดีบุก (Rochow และ Abel, 1973)

ดีบุกเป็นธาตุที่อยู่ระหว่างเจอร์เมเนียมและตะกั่วในหมู่ IV A ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 50 และมีมวลอะตอม 118.69 ดีบุกมีไอโซโทปตามธรรมชาติอยู่ 10 ไอโซโทปแสดงในตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงไอโซโทปของดีบุก (Rochow และ Abel, 1973)

Isotope	% Abundance in natural tin	Half-life	Isotope	% Abundance in natural tin	Half-life
$^{108}\text{Sn}$	-	0.167 days	$^{119\text{III}}\text{Sn}$	-	250 days
$^{109}\text{Sn}$	-	1080 sec	$^{119}\text{Sn}$	8.58	-
$^{110}\text{Sn}$	-	0.171 days	$^{120}\text{Sn}$	32.97	-
$^{111}\text{Sn}$	-	2100 sec	$^{121\text{III}}\text{Sn}$	-	>400 days
$^{112}\text{Sn}$	0.95	-	$^{121}\text{Sn}$	-	1.05 days
$^{113}\text{Sn}$	-	118 days	$^{122}\text{Sn}$	4.71	-
$^{114}\text{Sn}$	0.65	-	$^{123\text{III}}\text{Sn}$	-	2370 sec
$^{115}\text{Sn}$	0.34	-	$^{123}\text{Sn}$	-	136 days
$^{116}\text{Sn}$	14.24	-	$^{124}\text{Sn}$	5.98	-
$^{117\text{III}}\text{Sn}$	-	14 days	$^{125\text{III}}\text{Sn}$	-	570 sec
$^{117}\text{Sn}$	7.57	-	$^{125}\text{Sn}$	-	9.9 days
$^{118}\text{Sn}$	24.01	-	$^{126}\text{Sn}$	-	3000 sec
			$^{127}\text{Sn}$	-	5400 sec

สารประกอบอนินทรีย์ของดีบุกนั้นมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ มีเลขออกซิเดชันเป็น +2 และ +4 ซึ่งสารประกอบที่แสดงเลขออกซิเดชัน +4 นั้นจะอยู่ตัวที่สุด สารประกอบดีบุกที่แสดงเลขออกซิเดชัน +2 จะถูกออกซิไดส์ได้ในอากาศ ทำให้เกิดเป็นดีบุกเลขออกซิเดชัน +4 ดีบุกที่มีเลขออกซิเดชัน +2 จะมี รัศมีไอออน 1.02 อังสตรอม โดยธรรมชาติจะอยู่ในรูปออกตะไซด์รัลด์ โดยเกิดพันธะกับไอออนขนาดเล็ก เช่น ฟลูออไรด์และออกไซด์ เมื่อละลายน้ำจะถูกออกซิไดส์เป็นดีบุกเลขออกซิเดชัน +4 ความเป็นพิษต่ำ ดีบุกเลขออกซิเดชัน +4 จะมีรัศมีไอออน 0.74 อังสตรอม มักอยู่ในรูปของดีบุกออกไซด์ และมีแนวโน้มที่จะเกิดพันธะเตตระไซด์รัลด์ ดีบุกเกิดปฏิกิริยากับธาตุหมู่ 7 ยกเว้นฟลูออไรด์ ความเป็นพิษต่ำ

ดินบุกไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศและน้ำที่อุณหภูมิปกติ แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจะเกิดฟิล์มของออกไซด์ขึ้นปกคลุมผิว โดยความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดินบุกทำปฏิกิริยากับกรดแก่และเบสแก่ แต่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายที่ค่อนข้างเป็นกลาง กรดเจือจางทำปฏิกิริยากับดินบุกอย่างช้าๆ ได้เป็นเกลือของดินบุกและไฮโดรเจน

ดินบุกไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับไนโตรเจน ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สแอมโมเนีย ส่วนสารละลายแอลคาไลน์ทำปฏิกิริยากับดินบุก ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและอุณหภูมิ

ดินบุกทำปฏิกิริยาโดยตรงกับฮาโลเจน ได้เป็นสารประกอบของดินบุก โดยคลอรีน โบรมีน และไอโอดีน ทำปฏิกิริยากับดินบุกทันที ส่วนฟลูออรีนจะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง สารละลายที่เจือจางหลายชนิดทำปฏิกิริยากับดินบุกอย่างช้าๆ และก่อให้เกิดการกัดกร่อนตามมาซึ่งสารละลายเหล่านี้ ได้แก่ อะลูมิเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมซัลเฟต เหล็กคลอไรด์ อะลูมิเนียมโพแทสเซียมและกลีเซอรอล

## 2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนัก

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียจะมาจากแหล่งต่างๆ ทำให้การบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องใช้หลายวิธี และหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางชีวภาพ และ กระบวนการทางกายภาพ-เคมี

- **กระบวนการทางกายภาพ** คือ วิธีการบำบัดน้ำเสีย ที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรก ของระบบบำบัดน้ำเสียได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การตัดย่อย การกวาด การกวน การทำให้ลอย การตกตะกอนการแยกด้วยแรงเหวี่ยง การกรอง การกำจัดตะกอนหนัก เป็นต้น
- **กระบวนการทางเคมี** คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสีย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี แยกเอามลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอน การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน การฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น
- **กระบวนการทางชีวภาพ** คือ วิธีการบำบัดน้ำเสีย ที่อาศัยจุลินชีพที่จะทำการย่อยสลาย และเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นแก๊สลอยขึ้นสู่อากาศ และได้จุลินชีพเพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่



ระบบเอเอส (Activated sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment system) ระบบบ่อธรรมชาติ (Natural pond) เป็นต้น

- **กระบวนการทางกายภาพ-เคมี** คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพ และ ทางเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis) เป็นต้น

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมักจะใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้สารเคมีต่างๆ เติมลงไปลงในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่ทำให้เกิดการแยกสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการทางเคมี มีวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียหลายประการ ได้แก่ ปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสมกับความต้องการ สร้างตะกอนขนาดเล็กๆ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ง่าย มาเชื่อโรคในน้ำเสีย ก่อนปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมวิธีการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธีการ แต่จะใช้วิธีการใดจึงจะเหมาะสม สำหรับการบำบัดจำเป็นจะต้องพิจารณาในด้านต่างๆ เช่น ความต้องการในการกำจัดสารต่างๆ ในน้ำเสีย ลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น วิธีการกำจัดโลหะหนักมีหลายวิธีด้วยกัน สามารถจำแนกได้ดังนี้

### 2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสีย มักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากรู้น้ำได้ ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้ โดยวิธีตกตะกอนและวิธีการกรอง

ในการตกตะกอนต้องพิจารณาค่าพีเอช (pH) หลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปต้องมีพีเอชสูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ตารางที่ 2.5 ได้แสดงค่าพีเอชที่เหมาะสม และ ชนิดของสารเคมีที่เติมผสมลงไป เพื่อกำจัดหรือแยกมลสารออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอน โลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของ โลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมออกไซด์ เป็นสารเคมีที่ราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการตกผลึกในรูปหินปูน ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนสูง ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีราคาแพงกว่า และเกิดอันตรายได้ง่ายกว่าแคลเซียมออกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแล้ว อาจทำการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือการเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้นมีค่าความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

### 2.2.1.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) (Freeman, 1989)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จะใช้ตัวตกตะกอน คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาว) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) โดยเอาโลหะออกจากน้ำในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นตามสมการนี้



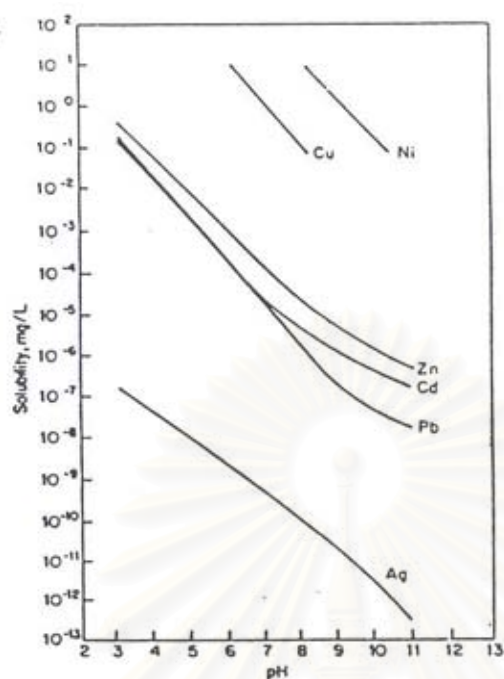
ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด จะมีค่าเท่าใดในการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโลหะที่มีอยู่ในน้ำ ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาพวะที่เกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆ ที่มีอยู่ และตัวที่ยับยั้งการตกตะกอน

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่บำบัดแล้ว มีค่าต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และในบางครั้งอาจต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ โลหะไฮดรอกไซด์จะเป็นพวกแอมโฟเทอริก (Amphoteric) หมายถึง สารที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส ที่พีเอชหนึ่งๆ ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ตัวหนึ่ง อาจสูงกว่าโลหะอื่น สำหรับน้ำเสียที่มีโลหะหลายๆ ชนิดปนกันอยู่ อาจมีระยะการตกตะกอนของโลหะแต่ละชนิดด้วยพีเอชแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2539)

มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย	สารเคมีที่เติมลงไป	ค่าพีเอชที่เหมาะสม	สารเคมีที่ตกตะกอนได้
Aluminum	Lime	5	$Al(OH)_3$
Arsenic	Ferric chloride	8	$AsCl_2$
Barium	Sodium sulfate	10	$BaSO_4$
Cadmium	Lime	9.5-12	$Cd(OH)_2$
Chromic	Lime	8.0-9.5	$Cr(OH)_3$
Cupric	Lime	9.0-10.0	$Cu(OH)_2$
Ferric	Lime	7	$Fe(OH)_3$
Fluoride	Lime	12	$CaF_2$
Manganese	Lime	10	$Mn(OH)_2$
Mercury	Sodium sulfide	8.5	$HgS$
Nickel	Lime	10	$Ni(OH)_2$
Phosphorus	Ferric chloride	7	$FePO_4$
Plumbic	Lime	6.0-10.0	$Pb(OH)_2$
Selenium	Sodium Sulfide	6.5	$SeS_2$
Silver	Sodium chloride	8	$AgCl$
Stannic	Lime	4-4.5	$Sn(OH)_2$
Zinc	Lime	5.0-6.0	$Zn(OH)_2$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



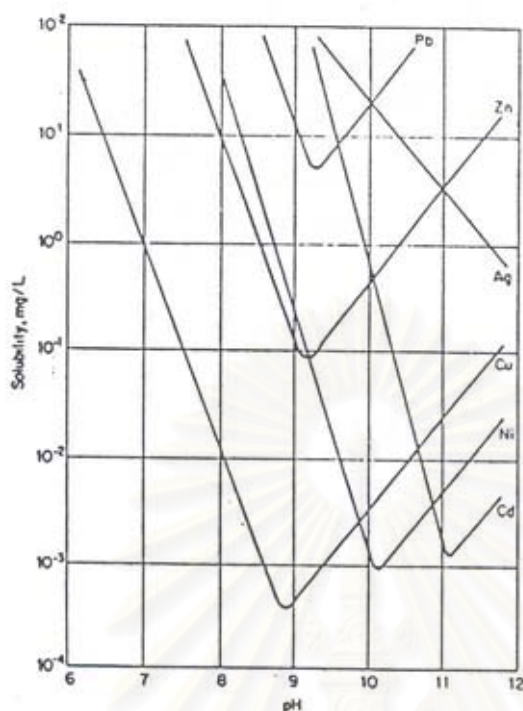
รูปที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ (Freeman, 1989)

### 2.2.1.2 การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

เป็นการตกตะกอนที่มีประโยชน์มาก เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง นอกจากการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายต่ำกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์ไม่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการรวมไอออนโลหะหนักด้วยซัลไฟด์เรดิคัล มีสมการแสดงปฏิกิริยาของโลหะหมู่ 2 กับ  $\text{Na}_2\text{S}$  ดังนี้คือ



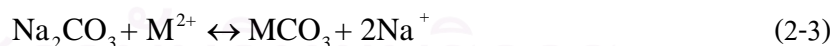
แหล่งของซัลไฟด์ที่ใช้คือ โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) หรือ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{NaHS}$ ) ข้อเสียของการตกตะกอนซัลไฟด์ คือ จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงควรทำพีเอชให้มากกว่า 8 เพื่อป้องกันไฮโดรเจนซัลไฟด์ ข้อเสียอีกข้อ คือจะมีปริมาณซัลไฟด์ไอออนมากเกินไปในน้ำที่จะปล่อยออก ซึ่งทำให้ต้องมีการบำบัดในขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำเสียออก



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์ (Freeman, 1989)

### 2.2.1.3 การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)

สำหรับโลหะบางตัว เช่น แคลเซียม ตะกั่ว การตกตะกอนคาร์บอเนต ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นโลหะหนักต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ ที่พีเอชต่ำกว่า และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า



### 2.2.1.4 การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride Precipitation)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ สามารถใช้ตกตะกอนโลหะได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับค่าพีเอช แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงพีเอช 8-11 ที่พีเอชต่ำกว่า 8 การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ปริมาณเพิ่มขึ้นโดยการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ ขณะที่พีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง พีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนด โดยการทดสอบความสมดุลของการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาทำปฏิกิริยา และ คุณภาพน้ำที่ปล่อยออกมา

การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์มีประโยชน์ สำหรับการนำกลับโลหะจากน้ำเสียและการเอาตะกั่ว ปรอท นิกเกิล ทองแดง แคลเซียม และโลหะมีค่า เช่น ทอง เงิน แพลทินัมออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาณตะกอนลดลง 50% หรือมากกว่า การศึกษาพบว่าสำหรับโซเดียมโบโรไฮไดรด์มีตะกอนน้อยกว่าตกตะกอนปูนขาว

สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละประเภท จะใช้ปริมาณที่แตกต่างกัน รวมถึงราคาของแต่ละสารจะมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.6

#### 2.2.1.5 ความสามารถในการละลาย (Benjamin, 2002)

เมื่อพิจารณาสมดุลของการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และค่าคงที่สมดุลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้



$$K_{sp} = \frac{\{M^{n+}\}\{OH^-\}^n}{\{M(OH)_{n(s)}\}} \quad (2-7)$$

ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับของแข็งจะถูกเขียน โดยของแข็งเป็นสารตั้งต้น โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี ค่าคงที่สมดุลถูกแสดงด้วยตัวห้อย S แล้วตามด้วยจำนวนลิแกนด์เขียนเป็นสัญลักษณ์  $K_{si}$  ซึ่งจะถูกใช้แสดงถึงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ที่มีของแข็งเป็นสารตั้งต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี และ สารเชิงซ้อนที่มีจำนวน  $i$  ลิแกนด์เป็นผลิตภัณฑ์ การเรียกค่าคงที่สมดุลสำหรับ  $K_{so}$  คือ  $K_{sp}$  สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้ ค่า  $K_{sp}$  แสดงได้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบการตกตะกอนแบบต่างๆ (Freeman, 1989)

การตกตะกอน	ไฮดรอกไซด์	ซัลไฟด์	คาร์บอเนต	โบโรไฮดรอกไซด์
ข้อดี	1.ราคาถูก	1. ค่าการละลายน้ำต่ำ 2.เอาน้ำออกจากตะกอนได้มากกว่าไฮดรอกไซด์	1.กรองตะกอนได้มาก	1.ใช้กับการนำกลับของโลหะ 2.ตะกอนน้อยกว่าไฮดรอกไซด์
ข้อเสีย	1.มีคุณสมบัติกึ่งโลหะ 2.เกิดตะกอนมาก 3.ละลายกลับได้เมื่อพีเอชเปลี่ยน	1.เกิดแก๊สไข่เน่า 2.มีไอออนของซัลไฟด์เกิดขึ้น 3.เกิดรูปคอลลอยด์	1.ใช้กับโลหะได้ไม่ทุกชนิด 2.ตะกอนมากกว่าไฮดรอกไซด์	1.ใช้ได้กับช่วงพีเอชสั้นคือ 8-11

ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ของการละลาย (Northland Community and Technical College, 2005)

Solute Name	Formula	$K_{sp}$	Solute Name	Formula	$K_{sp}$
Aluminum Arsenate	$AlAsO_4$	$1.6 \times 10^{-16}$	Calcium Chromate	$CaCrO_4$	$7.1 \times 10^{-4}$
Aluminum Hydroxide	$Al(OH)_3$	$2. \times 10^{-32}$	Calcium Fluoride	$CaF_2$	$4.0 \times 10^{-11}$
Aluminum Phosphate	$AlPO_4$	$6.3 \times 10^{-19}$	Calcium Hydroxide	$Ca(OH)_2$	$1.3 \times 10^{-6}$
Antimony(III) Sulfide	$Sb_2S_3$	$1.6 \times 10^{-93}$	Calcium Hydrogen Phosphate	$CaHPO_4$	$1 \times 10^{-7}$
Barium Arsenate	$Ba_3(AsO_4)_2$	$1.1 \times 10^{-13}$	Calcium Dihydrogen Phosphate	$Ca(H_2PO_4)_2$	$1.0 \times 10^{-13}$
Barium Carbonate	$BaCO_3$	$1.6 \times 10^{-9}$	Calcium Iodate	$Ca(IO_3)_2$	$7.1 \times 10^{-7}$
Barium Chromate	$BaCrO_4$	$8.5 \times 10^{-11}$	Calcium Oxalate	$CaC_2O_4 \cdot H_2O$	$2.3 \times 10^{-9}$
Barium Fluoride	$BaF_2$	$2.4 \times 10^{-5}$	Calcium Phosphate	$Ca_3(PO_4)_2$	$1.3 \times 10^{-32}$
Barium Hydroxide	$Ba(OH)_2$	$5.0 \times 10^{-3}$	Calcium Sulfate	$CaSO_4$	$6.1 \times 10^{-5}$
Barium Iodate	$Ba(IO_3)_2$	$1.5 \times 10^{-9}$	Calcium Sulfite	$CaSO_3$	$6.8 \times 10^{-8}$
Barium Oxalate	$BaC_2O_4 \cdot 2H_2O$	$1.1 \times 10^{-7}$	Cerium(III) Fluoride	$CeF_3$	$8 \times 10^{-16}$
Barium Phosphate	$Ba_3(PO_4)_2$	$6 \times 10^{-39}$	Chromium Arsenate	$CrAsO_4$	$7.8 \times 10^{-21}$
Barium Selenate	$BaSeO_4$	$2.8 \times 10^{-11}$	Chromium Fluoride	$CrF_3$	$6.6 \times 10^{-11}$



ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ของการละลาย (Northland Community and Technical College, 2005) (ต่อ)

Solute Name	Formula	$K_{sp}$	Solute Name	Formula	$K_{sp}$
Nickel Arsenate	$Ni_3(AsO_4)_2$	$1.9 \times 10^{-26}$	Strontium Carbonate	$SrCO_3$	$7 \times 10^{-10}$
Nickel(II) Carbonate	$NiCO_3$	$1.4 \times 10^{-7}$	Strontium Chromate	$SrCrO_4$	$3.6 \times 10^{-5}$
Nickel(II) Cyanide	$Ni(CN)_2$	$3.0 \times 10^{-23}$	Strontium Fluoride	$SrF_2$	$7.9 \times 10^{-10}$
Nickel(II) Hydroxide	$Ni(OH)_2$	$1.6 \times 10^{-16}$	Strontium Hydroxide	$Sr(OH)_2$	$3.2 \times 10^{-4}$
Nickel(II) Oxalate	$NiC_2O_4$	$4 \times 10^{-10}$	Strontium Iodate	$Sr(IO_3)_2$	$3.3 \times 10^{-7}$
Nickel(II) Sulfide	$NiS(g)$	$2.0 \times 10^{-28}$	Strontium Sulfate	$SrSO_4$	$3.2 \times 10^{-7}$
Scandium Hydroxide	$Sc(OH)_3$	$8.0 \times 10^{-31}$	Thallium(I) Chloride	$TlCl$	$1.7 \times 10^{-4}$
Silver Azide	$AgN_3$	$2.8 \times 10^{-9}$	Thallium(III) Hydroxide	$Tl(OH)_3$	$6.3 \times 10^{-46}$
Silver Bromide	$AgBr$	$5.0 \times 10^{-13}$	Tin(II) Hydroxide	$Sn(OH)_2$	$3 \times 10^{-27}$
Silver Carbonate	$Ag_2CO_3$	$8.1 \times 10^{-12}$	Tin(IV) Hydroxide	$Sn(OH)_4$	$1.0 \times 10^{-57}$
Silver Chloride	$AgCl$	$1.6 \times 10^{-10}$	Tin(II) Iodide	$SnI_2$	$1.0 \times 10^{-4}$
Silver Chromate	$Ag_2CrO_4$	$9.0 \times 10^{-12}$	Tin(IV) Sulfide	$SnS_2$	$1.0 \times 10^{-70}$
Silver Cyanide	$AgCN$	$1.2 \times 10^{-16}$	Tin(II) Sulfide	$SnS$	$1 \times 10^{-26}$

### 2.2.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน

เป็นวิธีการทางเคมี ที่ใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชันก่อน แล้วจึงนำไปกำจัดด้วยวิธีอื่นร่วมด้วย เช่น วิธีการทำให้ตกตะกอน วิธีการนี้จะเปลี่ยนรูปของโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่เป็นพิษ หรือ รูปที่ตกตะกอนได้ยาก ให้กลายเป็นรูปที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ง่ายขึ้น เช่น ออกซิเดชัน  $Zn_0$  ไปเป็น  $Zn^{2+}$  หรือ รีดักชัน  $Cu^{2+}$  ไปเป็น  $Cu_0$  เพื่อลดความเป็นพิษให้น้อยลง สารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ หรือออกซิเจน โอโซน โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) คลอรีน หรือ พวกลไฮโปคลอไรต์ คลอรีนไดออกไซด์ ( $ClO_2$ ) เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $NaBH_4$ ) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) เฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) เป็นต้น

### 2.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน

เทคนิคนี้จะอาศัยเรซิน (Resin) เป็นตัวแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลาย กับไอออนบนผิวเรซิน เรซินที่ใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange resin) เป็นพวกกรดอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble organic acid) ซึ่งอาจเป็นกรดซัลโฟนิก หรือ กรดคาร์บอกซิลิก (Sulfonic or carboxylic acid) วิธีการนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย เนื่องจากเรซินมีความจำเพาะเจาะจง แต่จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบไฟฟ้า แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และจะต้องมีการล้างเรซิน ด้วยกรด เพื่อที่จะนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้ (Manahan, 1993 อ้างถึงใน ขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์, 2539)

### 2.2.4 อิเล็กโทรไลซิส

อิเล็กโทรไลซิสเป็นกระบวนการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า ในของเสียอันตรายมีการใช้การแยกสลายด้วยไฟฟ้ากันมาก เช่น แคดเมียม ทองแดง ทองคำ ตะกั่ว เงินและสังกะสี ในกรณีที่โลหะมีสารประกอบพวกไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ จะนำกลับโดยวิธีการแยกสารด้วยไฟฟ้าค่อนข้างยาก เพราะสารจะมีความซับซ้อนมาก

### 2.2.5 การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง

วิธีนี้สามารถแยกสารปนเปื้อนขนาดตั้งแต่  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $1 \times 10^{-4}$  มิลลิเมตร นิยมใช้สำหรับการแยกเกลือออกจากน้ำทะเล และเป็นวิธีที่สามารถกำจัดพวกไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้ วิธีนี้ยังสามารถใช้ในการแยกไอออนโลหะหนัก ออกจากสารละลายได้ โดยให้ผ่านเพอมีเอเบิลเมมเบรน (Permeable membrane) เยื่อกรองนี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ เยื่อกรองไอออนบวก (Cation membrane) ซึ่งจะจับสารปนเปื้อนที่มีไอออนลบ และ ปล่อยให้สารที่มีไอออนบวกผ่านไปได้ เยื่อกรองไอออนลบ (Anion membrane) ซึ่งจะจับสารปนเปื้อนที่มีไอออนบวก และ ปล่อยให้สารที่มีไอออนลบผ่านไปได้ วิธีนี้ค่อนข้างนิยมใช้ ในกรณีที่สารละลายมีปริมาณ โลหะหนักน้อยชนิด และมีค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน แต่วิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าในการแยกโลหะหนัก

### 2.2.6 ออสโมซิสผันกลับ

เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย วิธีนี้สามารถแยกสารปนเปื้อน ขนาดตั้งแต่  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $6 \times 10^{-5}$  มิลลิเมตร โดยใช้การอัดความดันสูง ผ่านเซมิเพอมีเอเบิลเมมเบรน (Semipermeable membrane) แทนการใช้กระแสไฟฟ้า โดยเมมเบรนจะยอมให้ไอออนบางชนิดเท่านั้น ที่แพร่ผ่านไปได้ และจะต้องใช้ความดันสูงมาก ตั้งแต่ความดันบรรยากาศ จนถึง 6,900 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร วิธีนี้จะต้องใช้พลังงานมาก แต่ก็ทำให้ได้น้ำที่มีความสะอาด นอกจากนี้ยังนำไปใช้บำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพน้ำเสียได้มาตรฐานสูง หรือนำน้ำเสียนี้กลับมาใช้ใหม่ได้อีก สำหรับกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด

### 2.2.7 การดูดซับด้วยถ่าน

วิธีนี้ใช้หลักการดูดซับด้วยคาร์บอน เพื่อต้องการแยกสารที่ปนเปื้อน ละลายอยู่ในน้ำเสีย พวกถ่านที่ใช้กันมี 2 ลักษณะ คือ แบบคาร์บอนเป็นเม็ดๆ (Granular carbon) และ แบบคาร์บอนเป็นผง (Powdered carbon) ซึ่งนิยมเรียกรวมกันว่า Activated carbon คาร์บอนพวกนี้จะมีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำเสีย จะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุน ทำให้น้ำเสียสะอาด วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักได้

### 2.3 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

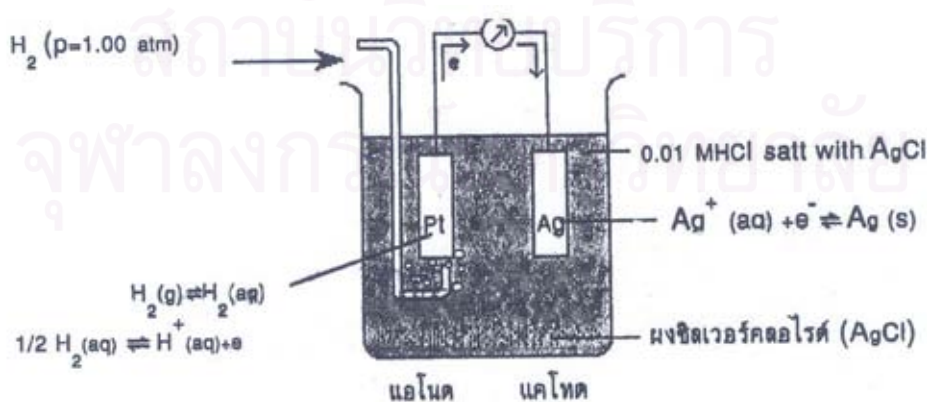
ในการทำเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า ประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อยที่สุด 3 ส่วน คือส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งเป็นตัวนำที่ต่อเชื่อม ระหว่างอุปกรณ์การวัดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่วนสุดท้าย คืออุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นสก็ป์หรือกระแส

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี 1 เซลล์ ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน ดังรูปที่ 2.4 หรือต่างกันได้ ดังรูปที่ 2.5 ขั้วไฟฟ้า 1 ขั้วในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นเพียงครึ่งเซลล์ (Half-cell) ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ แต่ละครึ่งเซลล์ ต้องเกิดปฏิกิริยารับหรือคายอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำในการรับหรือส่งอิเล็กตรอนนั้น เพื่อให้รู้หน้าที่ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น (คายอิเล็กตรอน) เรียกว่าขั้วแอโนด และขั้วไฟฟ้าของอีกครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้น (รับอิเล็กตรอน) เป็นขั้วแคโทด

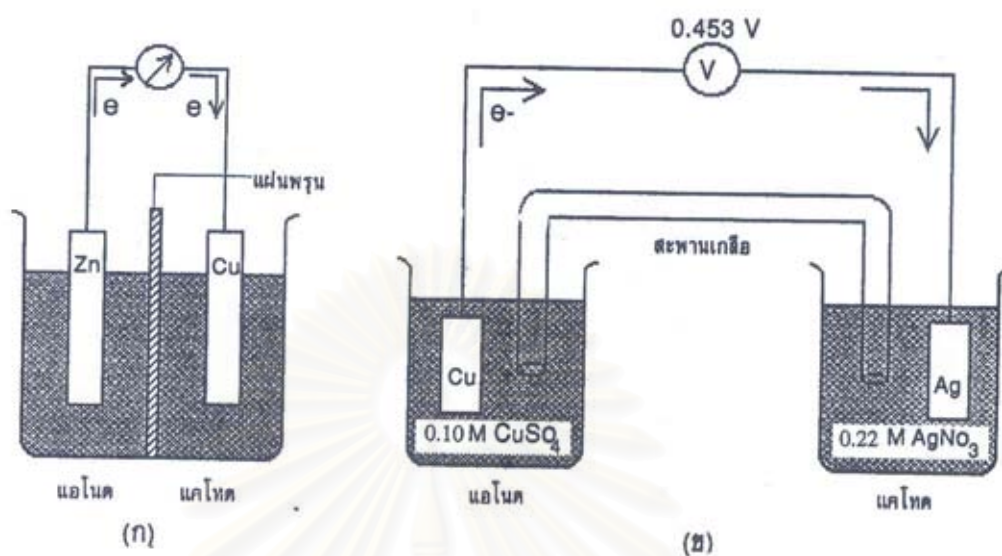
ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2.4 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)



รูปที่ 2.5 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยมีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

(ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพูน

(ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ

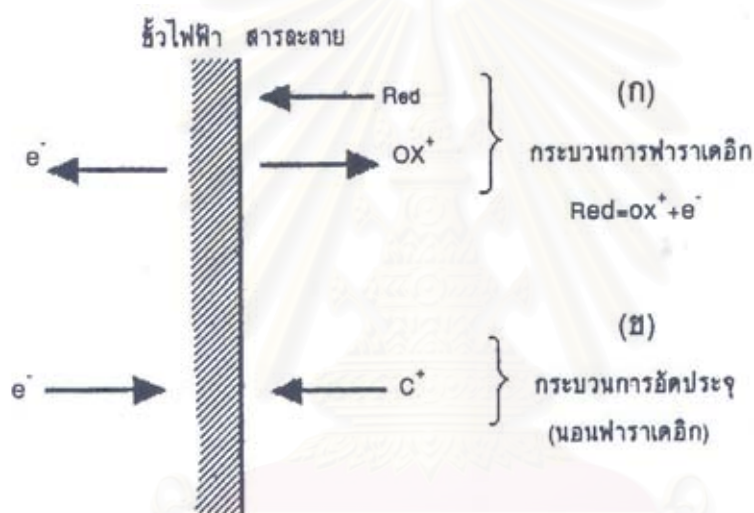
รูปที่ 2.5 เป็นการจัดเซลล์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เรียกเป็นการจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cells with liquid junction) แต่ละขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เหมือนกัน โดยอาจต่างกันที่ชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ หรือที่ความเข้มข้นหรือต่างทั้งชนิดและความเข้มข้นของแต่ละสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การแยกแต่ละครึ่งเซลล์ออกจากกันทำได้หลายวิธีด้วยกันที่ยกตัวอย่างในรูปที่ 2.5 (ก) เป็นการใช่วัสดุพูนเช่นใยแก้วและรูปที่ 2.5 (ข) เป็นการแยกภาชนะของแต่ละครึ่งเซลล์ และเชื่อมด้วยแท่งแก้วบรรจุด้วยสารละลายเข้มข้น เช่น KCl (โพแทสเซียมคลอไรด์) แท่งแก้วนี้ เรียกว่า สะพานเกลือ การแยกสารละลายด้วยสะพานเกลือในเชิงวิเคราะห์มีข้อดีกว่าการใช่วัสดุใยแก้ว เพราะช่วยลดค่าศักย์ที่รอยต่อของสารละลาย

### 2.3.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิด

กระบวนการฟาราเดิกที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นได้ เรียกว่า เกิดกระบวนการฟาราเดิก (Faradaic current)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้น แต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะ ที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดิก (Non-faradaic process) กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดิก (Non-faradaic current)

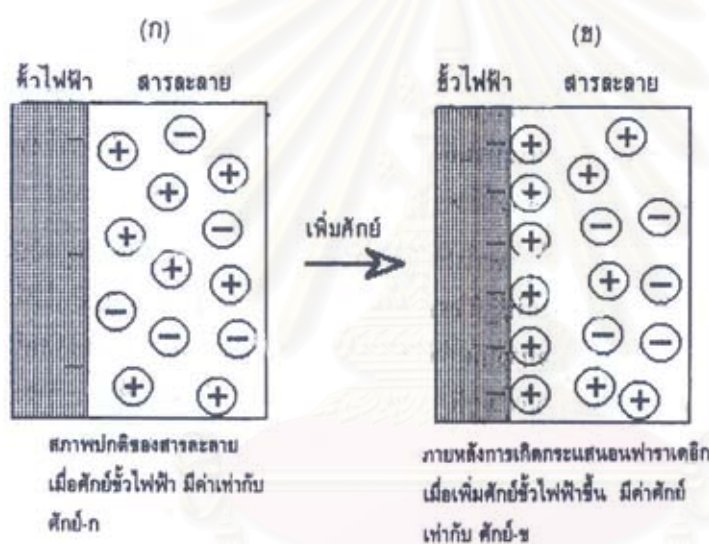


รูปที่ 2.6 รูปแบบแสดงกระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นฟาราเดิกหรือนอนฟาราเดิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี แต่ขึ้นกับสถานะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.7

ในรูปที่ 2.7 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมติให้เท่ากับศักย์ -ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออน

ตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายทั่ว ในสารละลาย ในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับ ขั้วไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.7 (ข) สมมติให้เท่ากับศักย์  $-x$  ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์  $-g$  จะเกิดการปรับสมดุล ของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มี การไหลของกระแสเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีก ครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่ เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และ กระแสที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

- การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติ ทำได้โดย
- ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้
- ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้ เรียกว่า สารดีโพลาริเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนั้นถูกเรียกว่า ขั้วดีโพลาริซ์

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสในวงจรอย่างต่อเนื่อง และสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยา การรับและคายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสและศักย์ย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาริเซชัน ขณะที่เกิดโพลาริเซชันขั้วไฟฟ้าถูกโพลาริซ์ ทำให้กระแสในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาริเซชันหมดไป จำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์แก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential or overvoltage)

### 2.3.2 โพลาริเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง อาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกันคือ

- เกิดการไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออน จากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไประยะหนึ่ง ในสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลาย ไปผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นไปยุ่งยากมากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้า ลดลงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น เรียกว่าเกิดโพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization) ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลายตลอดจนขนาดพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ที่สัมผัสกับสารละลาย มีส่วนในการทำให้โพลาริเซชันเกิดขึ้นมากหรือน้อย ผลของการเกิดโพลาริเซชันนี้ ย่อมทำให้ต้องเพิ่มศักย์ให้กับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรปกติ
- เกิดการชะลอของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจร อาจเนื่องจากมีความแรงของไอออนไม่มากพอ ทำให้ข้ามรอยต่อที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไม่ได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้น จะมีผลทำให้การไหลของกระแสในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization) ถ้าผลปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออน จะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของ



สารละลายหรือลดความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จะช่วยลดการเกิดโพลาไรเซชันนี้ได้

## 2.4 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมี ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า ในการจัดการวิเคราะห์หนึ่งๆ เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อยสองขั้ว คือขั้วแอโนดและขั้วแคโทด วัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น ไททาเนียม แพลตินัม เหล็ก อะลูมิเนียมและแกรไฟต์ เป็นต้น โดยคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดมีลักษณะดังนี้

### 2.4.1 ไททาเนียม (Titanium)

เป็นธาตุหมู่เดียวกับเซอร์โคเนียมและฮาฟเนียม ไททาเนียมเป็นโลหะทรานซิชัน มีลักษณะขาวคล้ายเงิน แข็งไม่เปราะและในบรรดาโลหะทรานซิชันทั้งหมด ไททาเนียมมีความหนาแน่นน้อยที่สุด ธาตุนี้ไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิธรรมดา แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับอโลหะ เกิดสารประกอบเช่น  $TiCl_4$  หรือ  $TiO_2$  เป็นต้น และทำปฏิกิริยากับไอน้ำให้ได้ออกไซด์กับไฮโดรเจน ไททาเนียมมีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +2 +3 และ +4 เลขออกซิเดชันที่สามัญที่สุดและเสถียรที่สุดภายใต้สภาวะต่างๆ คือ +4 เนื่องจากไททาเนียมเป็นโลหะที่แข็งและมีจุดหลอมเหลวสูง ดังนั้นจึงใช้ในการทำเครื่องยนต์ไอพ่น

### 2.4.2 แพลตินัม (Platinum)

มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงมาก คือมีจุดเดือดที่ 3,827 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส แพลตินัมเป็นโลหะที่มีลักษณะเป็นเงา สีมืดขาว อ่อนกว่าธาตุอื่นๆ จึงสามารถดัดให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ คล้ายกับเงินและทอง มีเลขออกซิเดชันหลายค่า ตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญ คือ +2 ถึง +4 เท่านั้น แพลตินัมอาจพบในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง นอกจากจะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่นๆ และมักจะพบอยู่ร่วมกับหลายธาตุเป็นโลหะเจือ และยังปรากฏรวมอยู่กับพวกธาตุทองแดง เงินและทองคำอีกด้วย แพลตินัมมีน้อยมาก จึงราคาแพงมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมากและไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา จึงมี

ประโยชน์ในการทำขั้วไฟฟ้า เบ้าทนไฟและภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูง และต้องการความต้านทานกัดกร่อนสูง

### 2.4.3 เหล็ก (Steel)

เป็นโลหะที่มีอยู่ในเปลือกโลกประมาณ 4.7% มากเป็นที่สองรองจากอะลูมิเนียม เหล็กเป็นโลหะแข็ง มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้าง แต่ไม่เสถียร และเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่เรียกว่าสนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับอโลหะทั้งหลายได้เกือบทั้งหมด เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อย แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ  $Fe^{2+}$  ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำ หรือ อยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์  $(Fe(H_2O)_6)^{2+}$  สารละลาย  $Fe^{2+}$  นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็น  $Fe^{3+}$  ได้  $Fe^{3+}$  อยู่ในสารละลาย เนื่องจาก  $Fe^{3+}$  มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมาก จึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้ง  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้

### 2.4.4 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในขอบข่ายเหล็กกล้าผสม ธาตุผสมที่สำคัญคือ โครเมียม ซึ่งจะมีตั้งแต่ 11% ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มอันนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิม ให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาแวววาว เหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้งานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก เพราะเป็นเหล็กกล้าที่มีความเหนียวหยุ่น และสามารถแต่งขึ้นรูปโดยวิธีกลึงไสได้ดี ส่วนใหญ่ใช้งานในด้านวิศวกรรมเคมีเนื่องจากทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้

#### 2.4.5 อะลูมิเนียม (Aluminum)

ในเปลือกโลกอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีมากเป็นที่สาม และเป็นโลหะที่มีมากที่สุด อะลูมิเนียมเป็นโลหะหมู่เดียวกับแกลเลียม อินเดียมและเทลลูเรียม อะลูมิเนียมเป็นโลหะสีขาว เบา และแข็งแรง แต่ไม่เปราะ สามารถทำให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ จึงนำมาใช้ประโยชน์ เช่น ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา อะลูมิเนียมจัดว่าว่องไว สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโควาเลนต์ เมื่ออยู่ในน้ำ  $Al^{3+}$  จะเกิดไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส กลือซัลเฟต ในเตรทและเฮไลด์ของอะลูมิเนียม ละลายน้ำได้ดี แต่ ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ

#### 2.4.6 แกรไฟต์ (Graphite)

เป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดตามธรรมชาติ อะตอมของแกรไฟต์จะจัดตัวเป็นระนาบเป็นชั้นๆ การยึดกันระหว่างระนาบนั้น ไม่ได้ยึดกันด้วยโควาเลนต์บอนด์ แต่ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม แกรไฟต์มีลักษณะทึบแสงและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย นำไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย

### 2.5 ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential, E)

คำจำกัดความของศักย์ไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่า ศักย์ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

การที่ต้องมีการกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไว้อย่างชัดเจน ก็เพื่อให้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน โดยสัญญาของการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาศักย์ ค่าผลลัพท์ของศักย์วงจรถือเป็นค่า ศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น

### 2.5.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ( $E^\circ$ )

ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อศักย์ไฟฟ้าว่า ถ้าขั้วไฟฟ้าหนึ่งของเซลล์เป็นขั้วไฮโดรเจน และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์จุ่มอยู่ในแอทวิตีเป็นหนึ่ง ศักย์เซลล์ของวงจรถือได้ว่าเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้ คือ ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต่างๆ ที่หาได้ด้วยวิธีนี้มีค่าเฉพาะของแต่ละครึ่งเซลล์ที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกัน และเทียบไปถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์จากสถานะที่แอทวิตีเป็นหนึ่ง ไปสู่ที่สถานะแอทวิตีสมดุล เมื่อเทียบกับขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าคงที่  $E^\circ$

1. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าหนึ่งของวงจร ต้องเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนเสมอ
2. ตามสัญนิยมของไฟฟ้าเคมี ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์จึงอาจถือเป็นศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (Relative reduction potential)
3. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเป็นตัวเลขที่ไม่ผันแปรไปตามจำนวน โมล ที่ใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
4. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า แปรตามอุณหภูมิ การแสดงค่าของ  $E^\circ$  ต้องบ่งบอกอุณหภูมิด้วยเสมอ
5. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ประกอบด้วยตัวเลขที่กำกับด้วยเครื่องหมายบวกหรือลบ ทั้งค่าของตัวเลขและเครื่องหมายต่างแสดงความหมายของศักย์มาตรฐานที่ต่างกันคือ เครื่องหมายบวก แสดงถึงความสม่าเสมอของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ครึ่งเซลล์ เมื่อเทียบกับครึ่งเซลล์ที่มีขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ในที่นี้ขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกัน เครื่องหมายลบ บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของครึ่งเซลล์ และขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นแอโนด

### 2.5.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ ( $E_R$ )

เซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ เมื่อครบวงจรเซลล์ การที่จะมีการไหลของกระแสเกิดขึ้น (ถ้าไม่คำนึงถึงผลของกระแสจากการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ต้องมีพลังงานไฟฟ้าในรูปศักย์จำนวนหนึ่ง ที่

เพียงพอที่ชนะความต้านทานของวงจร ศักย์จำนวนนี้ คือ ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสกับความต้านทาน (IR) ผลลัพธ์ศักย์รวมของเซลล์จึงต้องมีเทอมของศักย์จากความต้านทานนี้ด้วย ดังนี้

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_{\text{R}} \quad (2-10)$$

### 2.5.3 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน ( $E_p, \eta$ )

เมื่อมีโพลาริเซชันเกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็ผลเนื่องมาจากความเข้มข้นหรือเป็นแบบจลน์ ต้องมีการเพิ่มศักย์แก่วงจร ทั้งกรณีของเซลล์กัลวานิก หรือ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ ศักย์ที่เพิ่มถูกเรียกว่า ‘ศักย์เกินตัว’ (Overpotential,  $\eta$ ) ซึ่งทำให้ศักย์รวมของเซลล์ต่างไปจากศักย์อุณหพลวัตจากการคำนวณ ดังนั้นเมื่อมีโพลาริเซชันเกิดขึ้น การแสดงศักย์รวมของเซลล์ควรเป็น

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_{\text{R}} - \pi \quad (2-11)$$

## 2.6 แรงแเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ผ่านตัวนำเซลล์ไฟฟ้าหนึ่ง ต้องการพลังงาน 1 จูล ในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์ หมายความว่า มีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ เพราะฉะนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์ จากความหมายของพลังงานไฟฟ้า ดังกล่าวข้างต้นทำให้เห็นว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ}(W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (2-12)$$

แต่งานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้น เพราะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอน จะมีปริมาณประจุ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ สมมติว่า ในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายเทอิเล็กตรอน  $n$  โมล จะมีปริมาณประจุเท่ากับ  $n \times 96,487$  หรือ  $nF$  คูลอมบ์ ในเมื่อ  $F$  คือค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ต่อโมล เมื่อเป็นเช่นนี้ สมการจะเปลี่ยนเป็น

$$W_{\text{elec}} = nF \times E \quad (2-13)$$

$$W_{\text{elec}} = nE \times 96,487 \quad (2-14)$$

### 2.6.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่ง ไปอีกที่หนึ่ง จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Amp) จำนวนกระแสที่ผ่านไปหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด จะวัดในรูปของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density,  $I$ ) การวัดของกระแสที่ผ่านเข้าไปในวัสดุ เรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ในโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า ( $E_f$ ) มีหน่วยเป็น volt/cm ได้คือ

$$I = \text{ohm} \times E_f \quad (2-15)$$

$$E_f = \frac{I}{\text{ohm}} \quad (2-16)$$

$$E_f = \frac{V}{R \times \text{ohm}} \quad (2-17)$$

โดย	ohm	=	ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mhos/cm
	V	=	ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดมีหน่วยเป็น volt
	R	=	ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น mhos
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น amp

### 2.6.2 ค่าความนำไฟฟ้า

ค่าความนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และ ปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ความต้านทานกระแสไฟฟ้า ในวิธีทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์กับ ค่าความนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นตามสมการ

$$R = \frac{L}{C \times A} \quad (2-18)$$

R	=	ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโอห์ม
L	=	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
C	=	ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยซีเมน
A	=	พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์

### 2.6.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า  $Q$  คูลอมบ์ จะเท่ากับ กระแสไฟฟ้า  $I$  แอมแปร์ที่ผ่านไปเป็นเวลา  $t$  วินาที

$$Q = I \times t \quad (2-19)$$

พลังงานไฟฟ้า ( $W$ ) หมายถึง กระแสไฟฟ้า  $I$  ที่ผ่านความต้านทานในเวลา  $t$  วินาที มีศักย์ไฟฟ้า  $E$  เพราะฉะนั้น

$$W = EIt \quad (2-20)$$

$$W = E \times Q \quad (2-21)$$

หน่วยอีกอย่างหนึ่ง คือ วัตต์ (Watt) เป็นหน่วยของกำลังไฟฟ้า คิดจากพลังงานต่อวินาที เพราะฉะนั้น ถ้า  $P$  คือกำลังไฟฟ้า จะได้

$$P = E \times I \quad (2-22)$$

$$P = \frac{E \times Q}{t} \quad (2-23)$$

## 2.7 อิเล็กโทรเคมี

อิเล็กโทรเคมี เป็นเทคนิควิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี ที่มีการจัดเซลล์เป็นแบบอิเล็กโทรไลต์ ให้ผลปฏิกิริยาเป็นของแข็งพอกพูนอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยอิเล็กโทรเคมีประกอบด้วยกลไกทางไฟฟ้า ที่ต่อเนื่องกันถึง 2 กลไก คือ กลไกการแยกสารตัวอย่างออกจากสารละลาย อาจเรียกว่า เป็นการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) ตามด้วยกลไกการพอกพูนสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้า อาจเรียกเป็น การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ด้วยกลไกทางไฟฟ้าที่ปรับให้เหมาะสมเฉพาะกับเฉพาะสารที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้วิธีอิเล็กโทรเคมีมีความจำเพาะเจาะจงสูง ไม่มีการรบกวนหรือปะปนของสารที่ไม่ต้องการ ทั้งคำนวณปริมาณสารตัวอย่างได้โดยตรงจากน้ำหนักที่พอกพูนเพิ่มขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า

### 2.7.1 การแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

เมื่อพลังงานในรูปศักย์ที่ให้แก่เซลล์ มีค่ามากกว่าศักย์แตกตัว จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของไอออนของสารตัวอย่าง ได้ผลปฏิกิริยาในรูปโลหะ หรือ ของแข็งที่ขั้วไฟฟ้า

กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า เกิดการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลงของศักย์มากขึ้นเรื่อยๆ ขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่รับส่งในปฏิกิริยาด้วย เมื่อผลปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น ศักย์เปลี่ยนไปทางลบมากขึ้น การควบคุมเฉพาะศักย์ขั้วไฟฟ้าโดยการวัดค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าตลอดเวลา เทียบกับศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง แล้วจึงปรับศักย์เซลล์ให้มีค่าในระดับที่ทำให้ศักย์ขั้วไฟฟ้าใช้งาน อยู่ภายในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาตลอดการวิเคราะห์ ทำให้เกิดการแยกสลายของสารตัวอย่าง มีประสิทธิภาพตามต้องการนี้ เรียกว่าเป็นการแยกสลายสาร โดยการควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า (Controlled-electrode potential electrolysis)

## 2.7.2 การพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)

เมื่อการพอกพูนของสารตัวอย่างบนขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ กระแสที่ไหลในวงจรจะลดลงจนเป็นศูนย์ หรือจนมีค่าคงที่น้อยมาก แม้ยังคงให้พลังงานแก่เซลล์ ปฏิกิริยาหรือการไหลของกระแสขั้วไม่เกิดเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งควรต้องนำขั้วไฟฟ้าที่มีการพอกพูนของสาร ออกจากวงจรของเซลล์ ก่อนนำแหล่งพลังงานไฟฟ้าออก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการผกผันกลับของปฏิกิริยา ซึ่งทำให้สารที่จับกับขั้วไฟฟ้ากลับละลายไปในสารละลาย

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะพอกพูนของผลปฏิกิริยา ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ โดยทั่วไปพลังงานศักย์ที่ให้แก่เซลล์ไม่ควรมาก จนทำให้ความหนาแน่นของกระแสมากกว่า  $0.1 \text{ A/cm}^2$  การเกิดกระแสมากเกินไป เหมือนเป็นการเร่งการพอกพูนของสาร ทำให้การพอกพูนสารไม่เรียบ การกวนและอุณหภูมิ ก็ช่วยเร่งในการพอกพูนของสารที่ขั้วไฟฟ้าด้วย สาเหตุหนึ่งของการทำให้การพอกพูนสารไม่เรียบ หลุดง่าย เพราะการเกิดแก๊สขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ การเกิดรีดอกชันของน้ำให้แก๊สไฮโดรเจน หรือการเกิดออกซิเดชันของน้ำให้แก๊สออกซิเจน ในระหว่างการพอกพูนสารวิเคราะห์ ถึงแม้ฟองแก๊สทำให้เกิดการเคลื่อนพาไอออนดีขึ้น แต่ขณะเดียวกัน ก็สกัดกั้นการพอกพูนของสารบนขั้วไฟฟ้า ทำให้การเกาะของสารไม่เรียบและหลุดออกได้ง่าย ขณะล้างขั้วไฟฟ้าก่อนชั่งน้ำหนัก

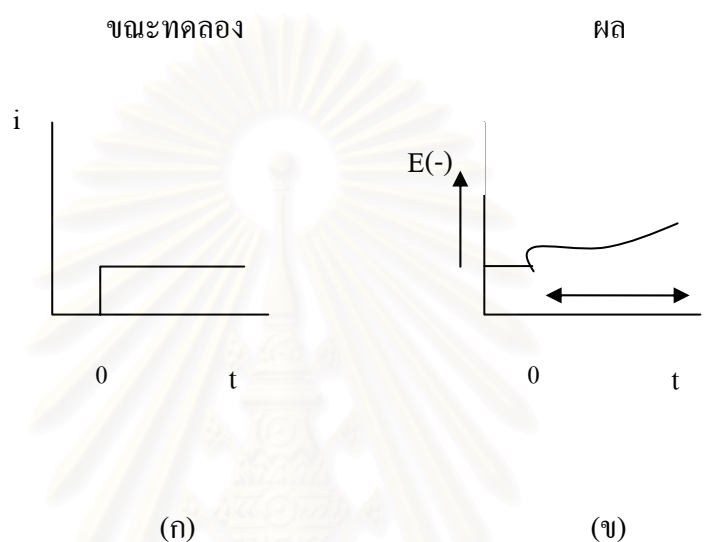
## 2.8 เทคนิควิธีวิเคราะห์อิเล็กโทรเกรวิเมตรี

### 2.8.1 อิเล็กโทรเกรวิเมตรีแบบกระแสคงที่หรือแบบไม่ควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric Technique โดยการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าคงที่



ทำให้ค่าความต่างศักย์ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ตามสมการของเนินสต์ ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่ เรียกว่า Transition time ( $\tau$ )



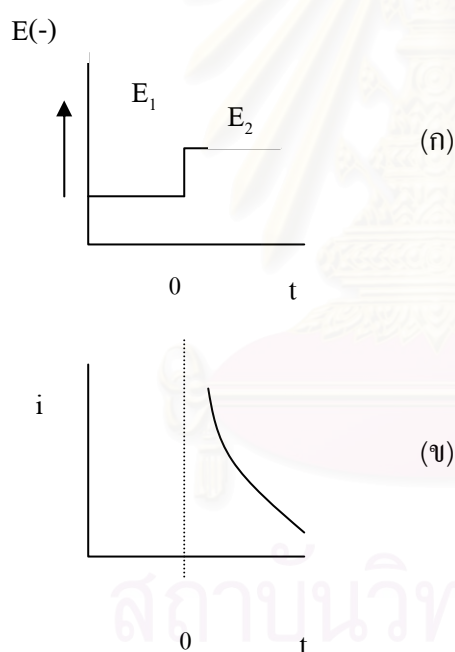
รูปที่ 2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
(Bard และ Faulker, 1980)

## 2.8.2 อิเล็กโทรแกรมเมตรี แบบควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า

หลักการของการควบคุมนี้ คือการควบคุมค่าความต่างศักย์ ระหว่างขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ในกระบวนการให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลาย จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของไอออนของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่ง แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก  $E_1$  เป็น  $E_2$  ที่ขั้วแคโทด

$E_1$  คือค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ  $E_2$  คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น Diffusion limited rate หรือเป็น Mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในรูป (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ( $I = kC$ )

การควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าในระหว่างการแยกสลายของสาร เพื่อพอกพูนบนขั้วไฟฟ้านั้น ช่วยให้การวิเคราะห์มีความถูกต้อง ไม่เกิดการพอกพูนของสารอื่นร่วมเข้ามา ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะกับการวิเคราะห์หาปริมาณหรือแยกส่วนผสมของโลหะในสารตัวอย่าง โดยการเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า เข้าไปในวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(Bard และ Faulker, 1980)

## 2.9 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (อินทรีรา หาดุพงษ์พันธ์, 2539)

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทด ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆที่เกิดขึ้นที่ใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้น

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการสลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อทำให้อิเล็กตรอน 1 โมลทำปฏิกิริยารีดอกซ์

$$F(\text{Faraday}) = e \times N \quad (2-24)$$

$$F(\text{Faraday}) = (1.602 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23})$$

$$F(\text{Faraday}) = 96,487 \text{Cmol}^{-1}$$

หรือ  $1 \text{ Faraday} = 96,500 \text{ coulomb}$

$$X \text{ coulomb} = I(\text{ampere}) \times t(\text{second}) \quad (2-25)$$

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = \frac{MIt}{nF} \quad (2-26)$$

$W$  = มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี (กรัม)

$n$  = จำนวนโมลของตัวออกซิไดส์ตามสมการเคมี (eq/mol)

$M$  = มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

$I$  = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์)

## 2.10 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency, $\theta$ )

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะ กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถที่จะใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นกระบวนการที่ดี ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จาก

$$\text{Current efficiency (t)\%} = \frac{nF(C_0 - C_t)V}{\int_0^t I(t)dt} \times 100 \% \quad (2-27)$$

n	=	ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อ โมล
F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/eq)
C <sub>0</sub>	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
C <sub>t</sub>	=	ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
I <sub>(t)</sub>	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

### 2.11 ปัจจัยที่ต้องควบคุมของเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะขึ้นอยู่กับการควบคุมดังนี้

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้ระบบ
2. ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับการประจุบนไอออนและขนาดของไอออน
3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรง กับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่ จะดีสำหรับการถ่ายและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า จำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับการระยะห่างที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้า ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น
6. จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าได้ ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ

## 2.12 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Holt และ Pearson (1997) ได้ศึกษาการละลายดีบุกจากแร่ดีบุกเกรดต่ำ ซึ่งทดลองโดยใช้ตัวอย่างแร่ที่มีดีบุก 14.2% และ 18.8% แร่จะถูกปั่นเป็นเม็ดและรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สผสมไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นโลหะดีบุก โดยจะบดเม็ดแร่ที่ได้ให้เป็นผงละเอียดขนาด 150 ไมครอน เพื่อนำไปละลาย การละลายจะกระทำโดยใช้ สารละลายต่างกันคือ HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ NaCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้สรุปว่า HCl มีประสิทธิภาพในการละลายดีบุกที่ดีที่สุด แต่ก็สามารถใช้ NaCl และ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ในปริมาณเท่ากันมาใช้ได้

Scott และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงการนำกลับของโลหะดีบุก ตะกั่วและทองแดง จากสารละลายที่ได้จากการล้างแผงวงจรไฟฟ้า โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร ในการศึกษานี้มีสองวิธีการในการนำกลับโลหะ วิธีการแรก คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับโลหะทั้งหมด วิธีการที่สอง คือ การใช้ไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของทองแดง และ ทำให้เกิดการตกตะกอนของดีบุกและตะกั่ว ซึ่งนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเข้าเตาเผา การใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร เพราะว่าสามารถใช้ในการนำกลับโลหะโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้ และลดการเกิดหมอกระหว่างที่ล้างแผงวงจร ในวิธีการแรก แยกดีบุกออกจากสารละลายได้ด้วยการกรอง เนื่องจากเกิดไฮดรอกไซด์ออกไซด์ ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และนำกลับได้โดยการใช้ไฟฟ้าเคมี โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีไททานเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้ว สารละลายที่มีไอออนของทองแดงและตะกั่วจะสามารถนำกลับได้ด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุก และได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับของโลหะ อย่างไรก็ตามมันก็ยังไม่เป็นการประหยัดนัก เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยต่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับทองแดง โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีโดยรวมกันกับการตกตะกอนดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ PbSO<sub>4</sub> และ SnO<sub>2</sub> จะถูกส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด แต่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีการทางไฟฟ้าเคมี เพราะว่าในการเผานั้นจะเกิดแก๊สและเกิดกากโลหะขึ้น

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่แขวนลอย ในปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน การศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของ

กระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่ากระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สามคือการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนหลักเมื่อเทียบกับทั้งหมดเพราะใช้ค่ากระแสมากที่สุด ในที่นี้ใช้ค่ากระแส 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

Carlos และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของทาร์เทรต ต่อการเกิดการพอกพูนของทองแดงและดีบุก ในสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลต่อลิตร โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี จากสารละลายที่ไม่มีไซยาไนด์ การพอกพูนของทองแดงและดีบุกที่ขั้วไฟฟ้า พบว่า ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.310 โวลต์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 66-68.5% ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 31.5-34.0% และที่ศักย์ไฟฟ้า -0.640 โวลต์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 45-51% ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 49-55% และจากการศึกษา จะพบว่าทาร์เทรตจะเพิ่มอัตราการเกิดผลึก และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าของกระแสที่เหมาะสม ที่ทำให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า ทั้งที่มีและไม่มีทาร์เทรตเกิดขึ้นที่ 11 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตาม การมีทาร์เทรตจะทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าในการเกิดการพอกพูนของโลหะที่ขั้วไฟฟ้า นำไปสู่การใช้พลังงานที่ต่ำกว่าตามไปด้วย

หทัยทัต ชื้อสุวรรณ (2544) ได้ทำการศึกษาถึงการประยุกต์ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกโลหะหนักออกจากตะกอน โดยแบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ละลายโลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียและการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีไฟฟ้าเคมี พบว่าในขั้นตอนการละลายตะกอนค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน ปริมาณตะกอนแห้งประมาณ 0.7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกรดซัลฟูริก คือ ประมาณ 1.0 โดยมีค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดโดยประมาณดังนี้ ทองแดง 70 ppm นิกเกิล 95 ppm สังกะสี 15 ppm และ โครเมียม 7 ppm ขั้นตอนการกำจัดโลหะพบว่า มากกว่า 90% ของทองแดงสามารถแยกออกมาได้ในสถานะโลหะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดและโลหะชนิดอื่นๆ ที่เหลือในสารละลายถูกกำจัดออกด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าสามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบ 100%

และกำจัดสังกะสีได้มากกว่า 80% ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110-130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยพลังงานที่ใช้ในช่วง 25-30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

มะลิ หุ่นสม (2544) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรกการนำกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนสุดท้ายเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่าโลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10, 90, 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

Reyes-Cruz และคณะ (2002) ได้ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินและทองจากสารละลายไซยาไนด์ โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจรเพื่อที่จะหาช่วงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเกิดการพอกพูนของทองและเงิน โดยที่มีความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายอยู่ในปริมาณสูง ขั้นตอนแรกได้เตรียมสารละลายในห้องทดลองที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์และทองแดงสูง และมีความเข้มข้นของทองและเงินในปริมาณที่ต่ำ ต่อมาได้ทำการศึกษาโดยการใช้สารละลายจากโรงงานอุตสาหกรรม ข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมีและการศึกษาถึงการแยกสารละลายโดยใช้ไฟฟ้า ได้แสดงให้เห็นว่าการพอกพูนของทองแดง จะเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบมากกว่าการพอกพูนของทองและเงิน การศึกษาโดยการวัดกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจรนี้ ได้ทำ ในสารละลายไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นของทองและเงินต่ำ โดยที่ไม่มีทองแดงด้วยเหมือนกัน การพอกพูนของทองและเงินจะไม่ถูกรบกวนโดยไอออนของทองแดงที่มีในปริมาณมาก เมื่อสารละลายถูกแยกสลาย โดยใช้ไฟฟ้าในห้องทดลอง โดยใช้ถังปฏิกรณ์ FM-01LC ขั้วแคโทด RVC ในขณะที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันของทอง และเงินในสารละลายไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นของไอออนทองแดงอยู่สูง จะเกิดในช่วงของศักย์ไฟฟ้า -1500 ถึง -1900 มิลลิโวลต์ โดยไม่มีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น เมื่อใช้สารละลายสังเคราะห์ในห้องทดลอง และ -1200 ถึง -1500 มิลลิโวลต์ สำหรับสารละลายจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ คาลอเมลอิ่มตัว

Spitzer และ Bertazzoli (2004) ได้ศึกษาถึงวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในการนำกลับของทองและเงินจากสารละลายไซยาไนด์ โดยใช้ไททาเนียมและคาร์บอนไอเป็นขั้วแคโทด ถึงปฏิกิริยาที่ใช้เป็นชนิดเครื่องกรอง ที่ใช้แรงดันอัดของเหลวเข้าไปและยึดติดอย่างหลวมๆ กับโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด บนขั้วแคโทดที่ทำจากคาร์บอนไอ โลหะที่มาเคลือบจะถูกลอกออกเป็นแผ่นบางเล็กๆ ที่นอกถึงปฏิกิริยา ในขณะที่ขั้วแคโทดที่ทำจากไททาเนียม โลหะที่มาเคลือบจะถูกลอกออกได้ง่ายด้วยซ็อนพลาสติก ไอออนทอง เงินและทองแดงจะถูกนำกลับจากสารละลายไซยาไนด์ โดยเงื่อนไขที่มีการควบคุมการถ่ายเทมวลสาร การศึกษาโดยวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ถูกใช้สำหรับระบุหาช่วงของศักย์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทอง ซึ่งเป็นกระบวนการหลัก ดังนั้นแล้วการควบคุมศักย์ไฟฟ้าในการแยกสลายโดยใช้ไฟฟ้า ถูกพิจารณาในช่วง -1.1 ถึง -1.6 โวลต์ และ -1.0 ถึง -1.2 โวลต์ เมื่อใช้ขั้วคาร์บอนไอและไททาเนียม เป็นขั้วไฟฟ้า ตามลำดับ โดยที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือคาโลเมลล์อิ่มตัว สำหรับการทดลองนี้ ศักย์ที่ต่ำจะทำให้เกิดการคัดเลือกที่ดีกว่า นั่นก็คือสารละลายโลหะผสมที่แยกโดยใช้ไฟฟ้า จะได้ทอง 76% และ 84% ที่ขั้วไททาเนียมและขั้วคาร์บอนไอ ตามลำดับ ทั้งขั้วไททาเนียมและขั้วคาร์บอนไอ ประสิทธิภาพของขั้วแคโทดที่ทำจากไททาเนียม มีค่าสูงกว่าขั้วคาร์บอนไอ 23% โลหะผสมถูกนำกลับที่ -1.0 โวลต์ และมี 15% เป็นทอง จากการทดลอง ทองจะถูกสกัดออกมาก่อนในช่วงของศักย์ที่ต่ำ ขณะที่ทองแดงจะถูกสกัดออกได้มาก ในศักย์ที่สูงกว่า เพราะศักย์ขั้วไฟฟ้าของทองแดงสูงกว่าศักย์ขั้วไฟฟ้าของทอง ที่ -1.0 โวลต์ บนแคโทดไททาเนียม หรือ -1.1 โวลต์ บนขั้วคาร์บอนไอ ทองถูกนำกลับโดยมีความบริสุทธิ์ 75-85% ขณะที่ในสารละลายมีความเข้มข้นของทองแดงอยู่ในปริมาณสูง ซึ่งเมื่อใช้ขั้วแคโทดคาร์บอนไอ ที่ -1.6 โวลต์ จะเกิดแก๊สไฮโดรเจน และประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลงถึง 16% บนขั้วไททาเนียม การเกิดไฮโดรเจนถูกคาดการณ์ไว้ที่ -1.1 โวลต์ ประสิทธิภาพเชิงกระแสจะลดลง พลังงานที่ใช้บนขั้วไททาเนียม น้อยกว่าที่ใช้บนขั้วคาร์บอนไอ เนื่องจากโลหะไททาเนียมทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศักย์เกินตัวบนขั้วไททาเนียมมีค่าต่ำกว่า และประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าสูงกว่านอกจากนี้ ไททาเนียมยังมีราคาที่ถูกกว่า

Xu, Schwandt และ Fray (2004) ได้ใช้วิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของดีบุกและลิเทียมที่ขั้วแคโทด ในสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ สารละลายผสมระหว่างลิเทียมคลอไรด์และดีบุกคลอไรด์ (4.5%โดยน้ำหนักของดีบุกคลอไรด์) ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 625 องศาเซลเซียส โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร จากการศึกษาได้พบว่า ที่ขั้วแคโทดจะเกิดการพอกพูนของโลหะดีบุกจากสารละลายคลอไรด์ผสมบนขั้วแกรไฟต์ ในอีกกรณีหนึ่ง ลิเทียมจะขวางกั้นการพอกพูนของโลหะลิเทียมที่ขั้วแกรไฟต์



Chen และ Lim (2005) ได้ทำการศึกษาถึงการนำกลับโลหะมีค่า โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไม่มีอิทธิพลมากต่อการนำกลับ ขณะที่การผสมด้วยความเร็วสูงจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น การมีอยู่ของกรดฮิวมิกที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่มีผลกระทบต่อ การนำกลับของโลหะ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มันจะทำให้ไปลดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะ การมีอิทธิพลจะไปลดอัตราการนำกลับของทองแดง การแข่งขันทางสิ่งแวดล้อมในการนำกลับของโลหะ มีการเรียงลำดับดังนี้ เงิน > ตะกั่ว > ทองแดง อุปกรณ์ XPS และ SEM ถูกใช้ในการแสดงถึงการลดลงของไอออน โลหะซึ่งไปเกิดการพอกพูนที่ขั้วพร้อมทั้งออกไซด์ที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

Garcia-Gabaldon และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาการนำกลับดีบุกและทองคำขาว โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยกระบวนการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ถึงปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี มีไดอะแพรมเซรามิกถูกใส่เข้าไป เมื่อไม่มีทองคำขาวอยู่ ศักย์ขั้วไฟฟ้าจะเป็นลบมากกว่า การเปลี่ยนรูปของดีบุกมีมากขึ้น เพราะว่าที่ขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะไม่ราบเรียบและเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้น ในขณะที่เดียวกันประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลง และพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับดีบุกก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะว่าเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด เงื่อนไขของการทดลอง คือ ศักย์ที่ขั้วแคโทดประมาณ -1.0 โวลต์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ที่อิ่มตัวด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ ไอออนดีบุกจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและเกิดเป็นดีบุก ไอออนของทองคำขาวส่งผลต่อการเกิดการพอกพูนของดีบุก ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.4 โวลต์ การนำกลับของโลหะทั้งสองมีความเป็นไปได้ที่จะถูกแยกออกจากกัน การมีไอออนทองคำขาวอยู่ จะเพิ่มให้เกิดการพอกพูนของดีบุก ที่ศักย์เป็นบวกมากกว่า -0.6 โวลต์ ที่ -0.6 โวลต์ เป็นค่าที่ต่ำสุดของพลังงานที่ใช้ แล้วทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแส มีค่ามากกว่า 70% อีกทั้งเป็นค่าที่ดีของการเปลี่ยนสภาพในรูปไอออนของทั้งดีบุก 100% และ ทองคำขาวได้มากกว่า 90%

Guaus และ Torrent-Burgues (2005) ศึกษาการพอกพูนของโลหะผสม ดีบุกและสังกะสี จากสารละลายซัลเฟต-ทาร์เทรตที่มีสังกะสี 20-30% โดยนำหนัก วิเคราะห์ข้อมูลโดยศึกษาโครงสร้าง และส่วนประกอบ ที่ขั้วไฟฟ้า ในที่นี้คือ คาร์บอนและทองแดง ผลการทดลองพบว่าการใช้ไอออนทาร์เทรตจะทำให้เกิดสารเชิงซ้อน ซึ่งจะเกิดการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ ภายใต้การควบคุมตลอดการทดลอง โดยที่การพอกพูนที่เกิดขึ้น มีสังกะสีเป็นส่วนผสม 20% โดยน้ำหนัก

Garcia-Gabaldon และคณะ ( 2006) ได้ทำการศึกษานำกลับของดีบุกจากสารละลาย โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ดำเนินการโดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า ถึงปฏิกรณ์ถูกแบ่งเป็นสองช่อง โดยไดอะแฟรมเซรามิก การที่ให้ค่ากระแสมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแส ในการนำกลับของดีบุกมีค่าต่ำลง เนื่องจากเกิดแก๊สไฮโดรเจน ในอีกแง่หนึ่ง คือ การเพิ่มค่ากระแสจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของดีบุกได้มากขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร สังกะสีจากแก๊สไฮโดรเจน และเกิดความไม่ราบเรียบขึ้นที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางไฟฟ้าเคมี มีความสัมพันธ์กับการให้ค่ากระแส เมื่อมีการให้ค่ากระแสที่สูงมาก ความเข้มข้นของดีบุก จะลดลงอย่างมาก จากการทดลองจะพบว่าค่ากระแสที่เหมาะสมคือ 200 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนถึง 0.83 และประสิทธิภาพเชิงกระแส มีค่า 83%

Starowicz, Stypula และ Banas (2006) ได้ทำการศึกษารังเคราะห์เงิน ที่มีอนุภาคขนาดนาโน ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี การทดลองได้เตรียมเงิน โห้เทียมไนเตรทในสารละลายเอทานอล ได้ศึกษาโดยวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจรและกระแส ณ เวลาต่างๆ การพอกพูนที่เกิดขึ้นประกอบด้วยโลหะเงินอนุภาคขนาดนาโน โดยได้มาทั้งวิธีที่ควบคุมให้กระแสคงที่ และทั้งวิธีที่ควบคุมให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ กลไกนี้ได้ถูกสันนิษฐานว่า เกิดการสลายตัวของเงินทั้งที่ขั้วแอโนด และไอออนของเงินก็เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นโลหะต่อไป ระหว่างที่เกิดการโพลาริเซชันในเอทานอล ในขั้นสุดท้ายซิลเวอร์ออกไซด์จะรับอิเล็กตรอนจากแอลดีไฮด์ ซึ่งแอลดีไฮด์เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอทานอล วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ใช้อุปกรณ์ที่ราคาไม่แพงและไม่ต้องการสารรีดิวซ์เพิ่มเติม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

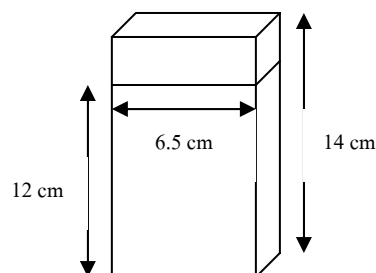
#### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของเสี่ย  
อันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง ( 4 Digits Balance ): Mettler-Toledo, Dragon 204
2. เครื่องวัดพีเอช ( pH meter ): Denver Instrument, model 215
3. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS ( Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS ): GBC, Avanza
4. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ( Magnetic stirrer): VELP, ARED
5. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply): GW, INSTEK
6. เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Conductivity): Hach, Sension 5
7. บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร
8. กระดาษกรอง (Filter paper): Whatman
9. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
10. ขั้วไฟฟ้า มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำด้วยแกรไฟต์ และ เหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 6.5x12 ตารางเซนติเมตร และ 3.25x12 ตารางเซนติเมตร ดูได้จากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl): Carlo ERBA
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH): Carlo ERBA
3. โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide,  $\text{Na}_2\text{S}\cdot\text{XH}_2\text{O}$ ): QP Panreac
4. ทินคลอไรด์ (Tin (IV) chloride pentahydrate,  $\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ): Riedel-deHaen

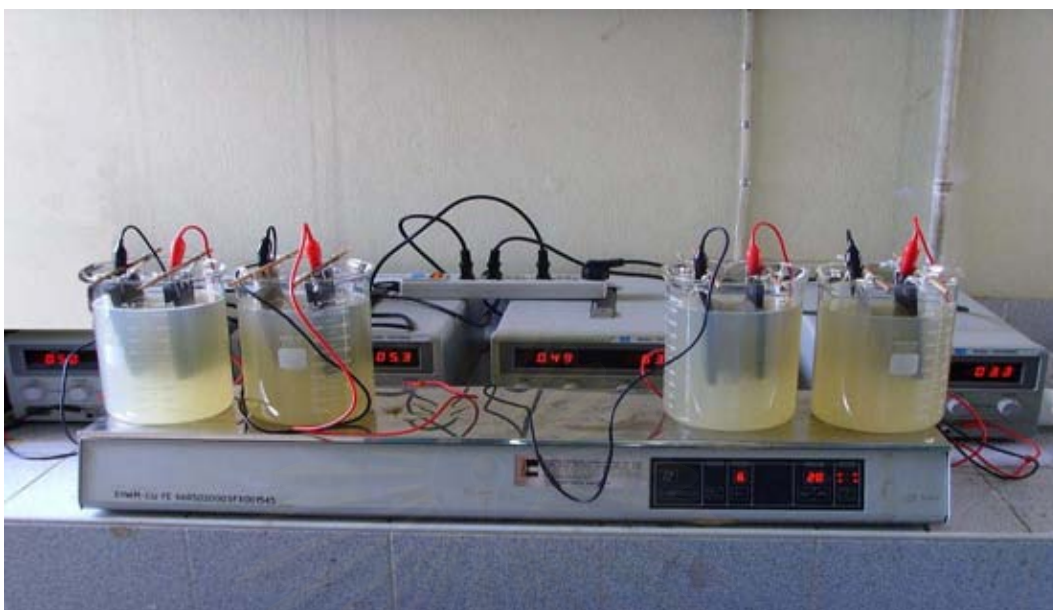
### 3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

1. น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ เตรียมจากกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยเตรียมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% ปริมาตร 83 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นให้ครบ 1000 มิลลิลิตร จากนั้น เตรียม  $\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ให้มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตรในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยตักสาร  $\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  3.5 กรัม ละลายลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้
2. น้ำเสียจริง เป็นน้ำที่เก็บจากส่วนบำบัดอากาศแบบ Scrubber ของโรงงานโลหะบัดกรี เนื่องจากเมื่อทำการตรวจวัดค่าของดีบุกในน้ำเสียจริง พบว่ามีค่าดีบุกละลายอยู่ 2-7 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำการละลายดีบุกเพิ่มในน้ำเสียจริง โดยใช้ความเข้มข้นของดีบุก 0.01 โมลต่อลิตร อีกทั้งทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจริง โดยการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เพื่อให้พีเอชเท่ากับ 0 เนื่องจากต้องการให้เกิดไอออนของดีบุกในสารละลาย โดยที่ไม่เกิดเชิงซ้อน (Schlesinger และ Paunovic, 2000)

### 3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

1. เตรียมสารละลาย ปริมาตร 1.8 ลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร
2. นำขั้วไฟฟ้า เจาะรู เพื่อที่จะผูกเชือกและร้อยเข้ากับไม้ เพื่อที่จะวางค้ำบนปากบีกเกอร์
3. ขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการให้เกิดการเกาะของโลหะ ในที่นี้คือ ขั้วแกรไฟต์ และขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม
4. ขั้วบวก นำมาต่อเข้ากับขั้วแกรไฟต์

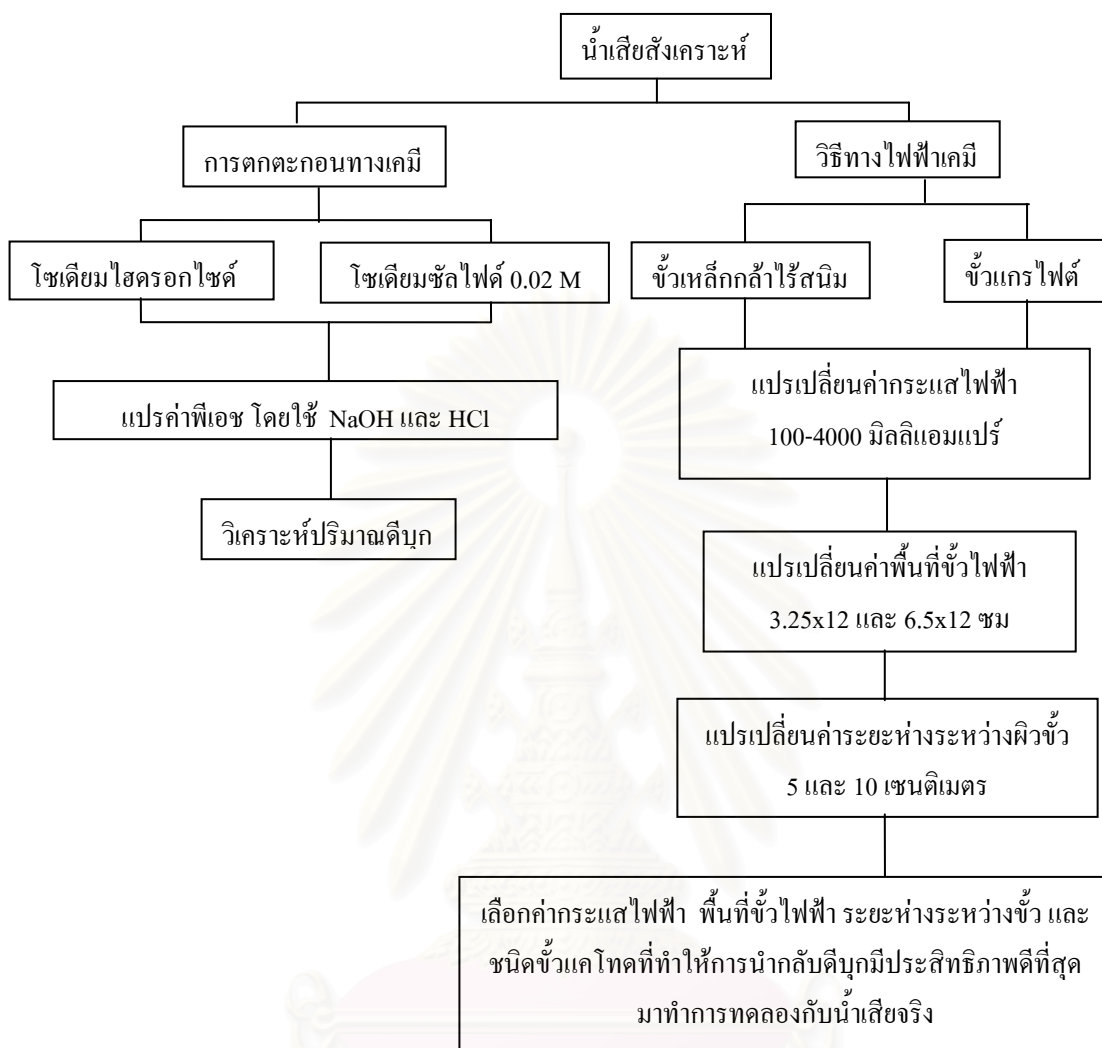
การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนหลักๆ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนดีบุกประจุบวกที่เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ในน้ำเสียดังเคราะห์ โดยใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมซัลไฟด์ ส่วนที่ 2 ศึกษาถึงการนำกลับดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ในน้ำเสียดังเคราะห์ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยแปรเปลี่ยนตัวแปรที่มีผลต่อการนำกลับ ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า พื้นที่ขั้วไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแคโทด 2 ชนิด คือ แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแอโนดแกรไฟต์ หลังจากนั้นจะนำตัวแปรที่มีค่าประสิทธิภาพการนำกลับดีบุกดีที่สุด มาทำการทดลองกับน้ำเสียดังเคราะห์ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนที่ 3 โดยแสดงแผนผังการดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 3.3



### รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงภาพรวมของการทำวิจัย

#### 3.2.1 การทดลองการตกตะกอนดีบุก

การทดลองนี้เป็นการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของพีเอชต่อความสามารถในการละลายของดีบุก เพื่อให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการตกตะกอนดีบุก

การทดลองที่ 1 การตกตะกอนดีบุกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์/โซเดียมซัลไฟด์ มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูป 3.4 โดยตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอนแสดงในตารางที่ 3.1 และมีวิธีการทดลองดังนี้

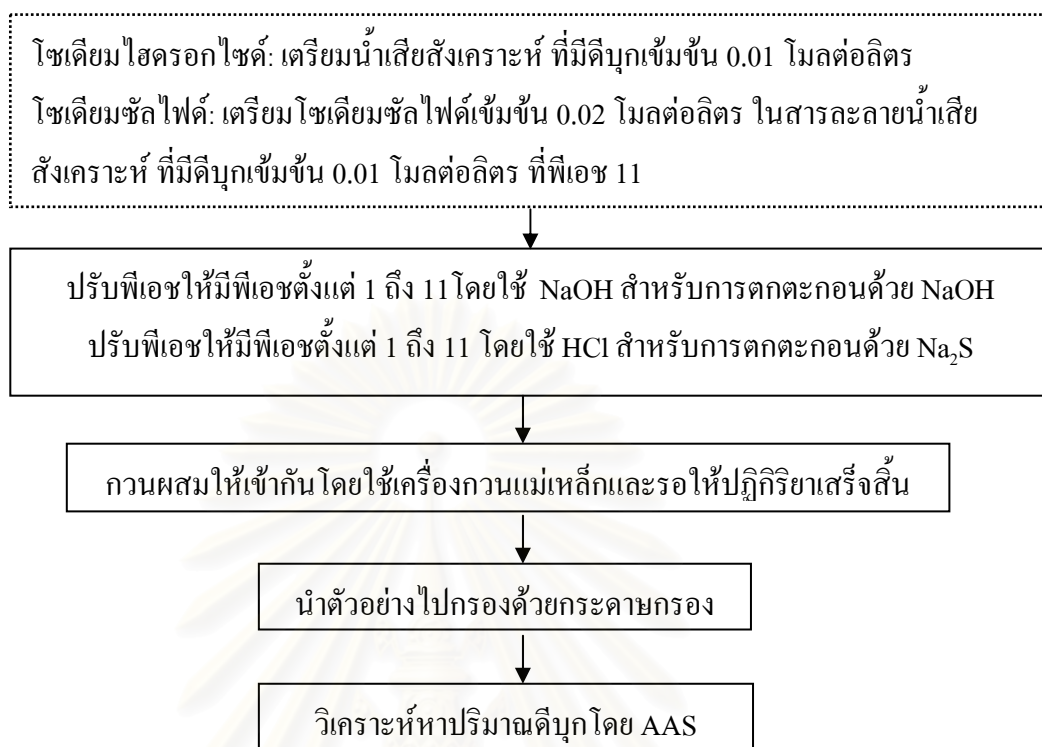
1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ปีกเกอร์ละ 50 มล.
2. ปรับพีเอช ให้แต่ละตัวอย่างมีพีเอชตั้งแต่ 1 ถึง 11 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์
3. ทำการกวนโดยเครื่องกวนแม่เหล็กและรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น
4. นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง
5. ตรวจวัดค่าความเข้มข้นด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
6. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

หมายเหตุ ในการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ จะเตรียมโซเดียมซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 11 หลังจากนั้นจึงทำการปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก ให้มีพีเอชตามต้องการ

**ตารางที่ 3.1** ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอนดีบุกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อุณหภูมิ</li> <li>2. สารที่ใช้ในการตกตะกอน</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อุณหภูมิห้อง</li> <li>2. โซเดียมไฮดรอกไซด์</li> <li>3. โซเดียมซัลไฟด์ 0.02 โมลต่อลิตร</li> </ol>
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พีเอช</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พีเอช 1 ถึง พีเอช 11</li> </ol>
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ประสิทธิภาพในการตกตะกอน</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความเข้มข้นของดีบุก</li> </ol>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการตกตะกอนดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

### 3.2.2 การทดลองโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการนำกลับของดีบุก

การทดลองนี้เป็นการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึง กระแสไฟฟ้า พื้นที่ขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และชนิดของขั้วแคโทด (แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม) ที่มีผลต่อการนำกลับของดีบุก โดยที่ตัวแปรในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.2

การทดลองที่ 2 การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ขั้วแคโทดเหล็กกล้าไร้สนิม/แกรไฟต์ มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูป 3.5 ถึง 3.7 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 1.8 ลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร
2. ทำการแปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 2000 และ 4000 มิลลิแอมแปร์ โดยที่ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม/แกรไฟต์ เป็นขั้วแคโทด พื้นที่ขั้วไฟฟ้าคือ 6.5x12 ตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้ว คือ 5 เซนติเมตร
3. เก็บน้ำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้น ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



4. เปรียบเทียบการนำกลับของค่ากระแสไฟฟ้า และเลือกค่ากระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดมาทำการทดลองในขั้นต่อไป ดังรูปที่ 3.5
5. ทำการทดลองต่อ โดยแปรเปลี่ยนพื้นที่ขั้วไฟฟ้าคือ 3.25 x 12 ตารางเซนติเมตร และ 6.5 x 12 ตารางเซนติเมตร โดยที่ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากข้อที่ 4 และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร
6. เก็บน้ำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้น ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
7. เปรียบเทียบการนำกลับของดีบุกเมื่อมีการเปลี่ยนพื้นที่ขั้วไฟฟ้า โดยเลือกค่าพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการนำกลับ มาทำการทดลองในขั้นต่อไป ดังรูปที่ 3.6
8. ทำการทดลองต่อโดยแปรเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขั้ว คือ 5 และ 10 เซนติเมตร โดยที่ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 4 และใช้พื้นที่ขั้วไฟฟ้า ที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 7 ดังรูปที่ 3.7
9. เก็บน้ำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้น ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
10. ทดสอบการทดลองทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การทดลองที่ 3 การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียจริง โดยใช้ ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 6.5x12 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร และชนิดขั้วแคโทดเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการนำกลับดีบุกดีที่สุด มาทำการทดลองกับน้ำเสียจริงที่เก็บจากส่วนบำบัดอากาศแบบ Scrubber จากโรงงานโลหะบัดกรีแห่งหนึ่ง ดังแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูป 3.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า พื้นที่ขั้วไฟฟ้าและระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อการนำกลับคืนกเมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมและแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด

- หากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า</li> <li>2. พื้นที่ขั้วไฟฟ้า</li> <li>3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า</li> <li>4. เวลาเก็บกัก</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เหล็กกล้าไร้สนิม/แกรไฟต์</li> <li>2. 6.5x12 เซนติเมตร</li> <li>3. 5 เซนติเมตร</li> <li>4. 6 ชั่วโมง</li> </ol>
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. กระแสไฟฟ้า</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 100 ถึง 4000 มิลลิแอมแปร์</li> </ol>
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ประสิทธิภาพในการนำกลับ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่าความเข้มข้นของสารละลาย</li> <li>2. ค่าความนำไฟฟ้า</li> </ol>

- หาค่าพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า</li> <li>2. ระยะห่างระหว่างขั้ว</li> <li>3. เวลาเก็บกัก</li> <li>4. กระแสไฟฟ้า</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เหล็กกล้าไร้สนิม/แกรไฟต์</li> <li>2. 5 เซนติเมตร</li> <li>3. 6 ชั่วโมง</li> <li>4. ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง</li> </ol>
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พื้นที่ขั้วไฟฟ้า</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 3.25x12 และ 6.5x12 (ตร.ซม.)</li> </ol>
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ประสิทธิภาพในการนำกลับ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่าความเข้มข้นของสารละลาย</li> <li>2. ค่าความนำไฟฟ้า</li> </ol>

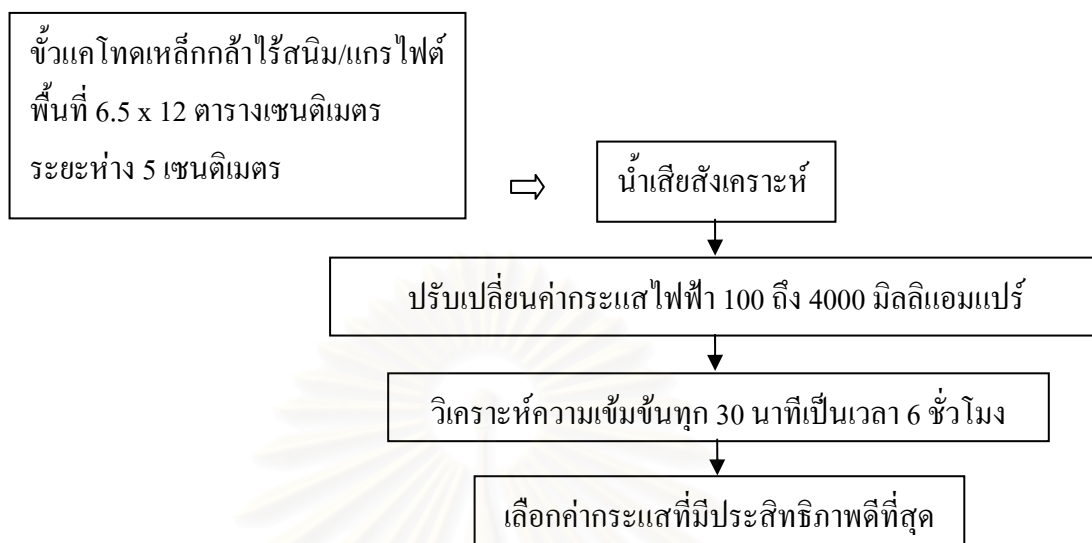
- หาค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 3. เวลาเก็บกัก 4. กระแสไฟฟ้า	1. เหล็กกล้าไร้สนิม/แกรไฟต์ 2. ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3. 6 ชั่วโมง 4. ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ระยะห่างระหว่างขั้ว	1. 5 และ 10 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการนำกลับ	1. ค่าความเข้มข้นของสารละลาย 2. ค่าความนำไฟฟ้า

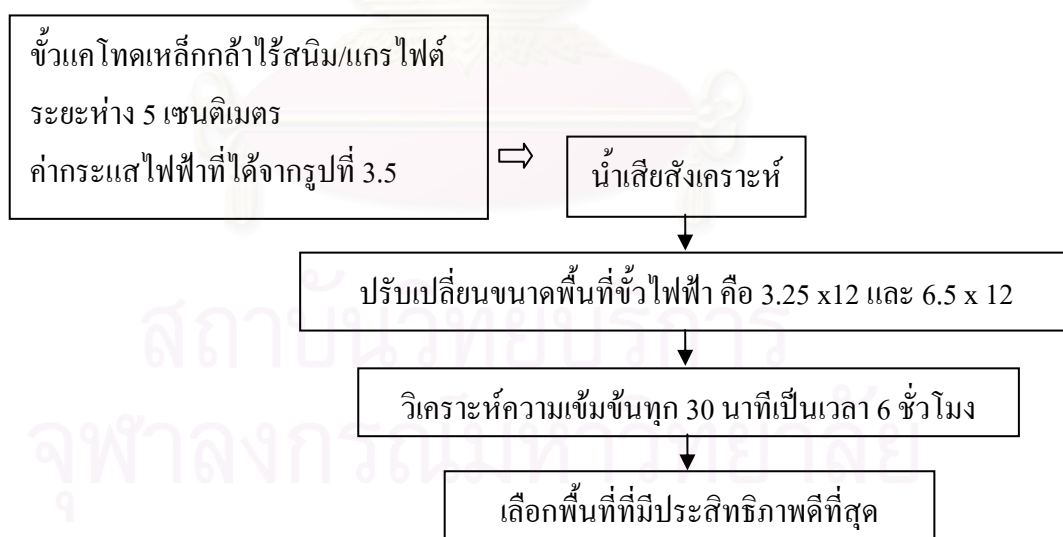
- หาค่าประสิทธิภาพในการนำกลับดีบุกเมื่อทดลองกับน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. กระแสไฟฟ้า 3. พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 4. ระยะห่างระหว่างขั้ว 5. เวลาเก็บกัก	1. ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 2. ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3. ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 4. ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 5. 6 ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการนำกลับ	1. ค่าความเข้มข้นของสารละลาย 2. ค่าความนำไฟฟ้า

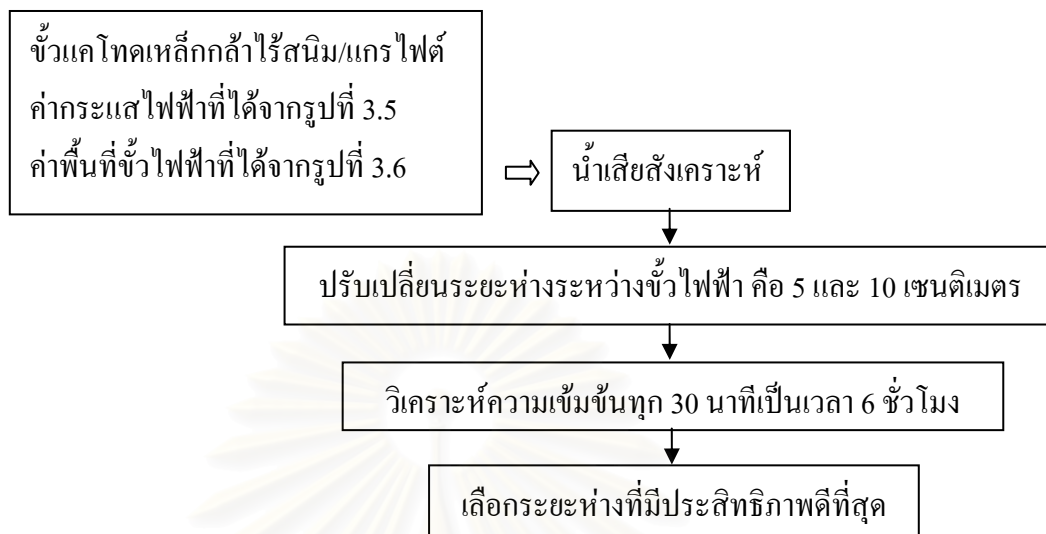
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



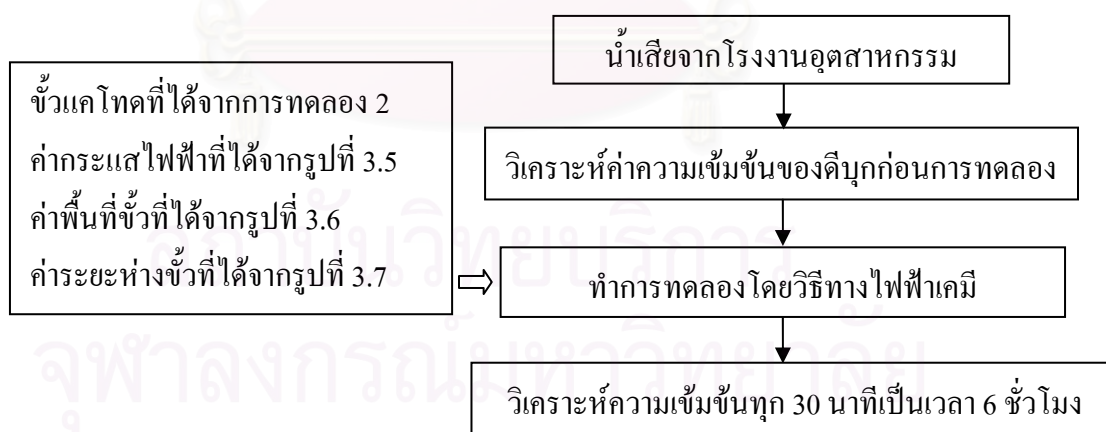
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงการทดลองหาพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการทดลองหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงการทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของน้ำเสียจริง

### 3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

การหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัดค่า
โลหะหนัก	AA, Direct Aspiration U.S. EPA 0218.1 60014-79-020
พีเอช	Electrometric Method U.S. EPA 0150.1 60014-79-020



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการนำกลับดีบุก โดยการใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) และน้ำเสียจริงใช้น้ำเสียในส่วนของระบบบำบัดอากาศแบบ Scrubber ของโรงงานโลหะบัดกรีแห่งหนึ่ง โดยการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เพื่อที่จะทำให้พีเอชน้อยกว่า 1 เนื่องจากเพื่อที่จะให้เกิดไอออนของดีบุกในสารละลาย โดยที่ไม่เกิดเชิงซ้อนในสารละลาย (Schlesinger และ Paunovic, 2000)

ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีบุก แบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลองดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เพื่อศึกษาค่าพีเอชที่มีความเหมาะสม ในการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์

การทดลองที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เพื่อศึกษาถึงค่ากระแสไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและชนิดของขั้วไฟฟ้า

การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียจริง จากน้ำเสียในส่วนของระบบบำบัดอากาศแบบ Scrubber ของโรงงานโลหะบัดกรีแห่งหนึ่ง โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2

**4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี**

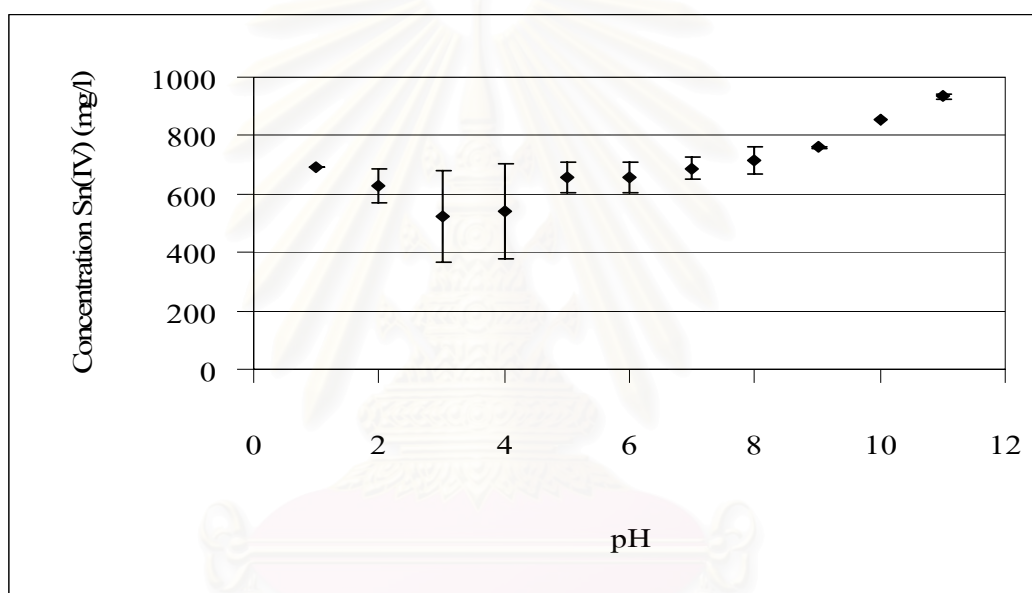
#### **4.1.1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์**

ในการทดลองนี้จะแปรเปลี่ยนพีเอช ของน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีความเข้มข้นดีบุก 0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วตรวจวัดลักษณะของน้ำเสีย

หลังการทดลอง ซึ่งผลการทดลองจะแสดงใน รูปที่ 4.1

เมื่อมีการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมี  $\text{Sn}^{4+}$  0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชแตกต่างกัน จะมีความสามารถในการละลายแตกต่างกัน โดยที่ความสามารถในการละลายนี้ จะแสดงถึงความสามารถในการตกตะกอน นั่นคือ ณ พีเอช ที่มีความสามารถในการละลายต่ำ จะสามารถตกตะกอนได้มาก

จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 3 ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของกราฟ  $\text{Sn}^{4+}$  ยังสามารถละลายในน้ำเสียสังเคราะห์  $4.4 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร คิดเป็น 43.97% ดังนั้นจึงสามารถนำกลับคืนในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ 56.03% ซึ่งจะอยู่ในรูป  $\text{Sn}(\text{OH})_{4(s)}$

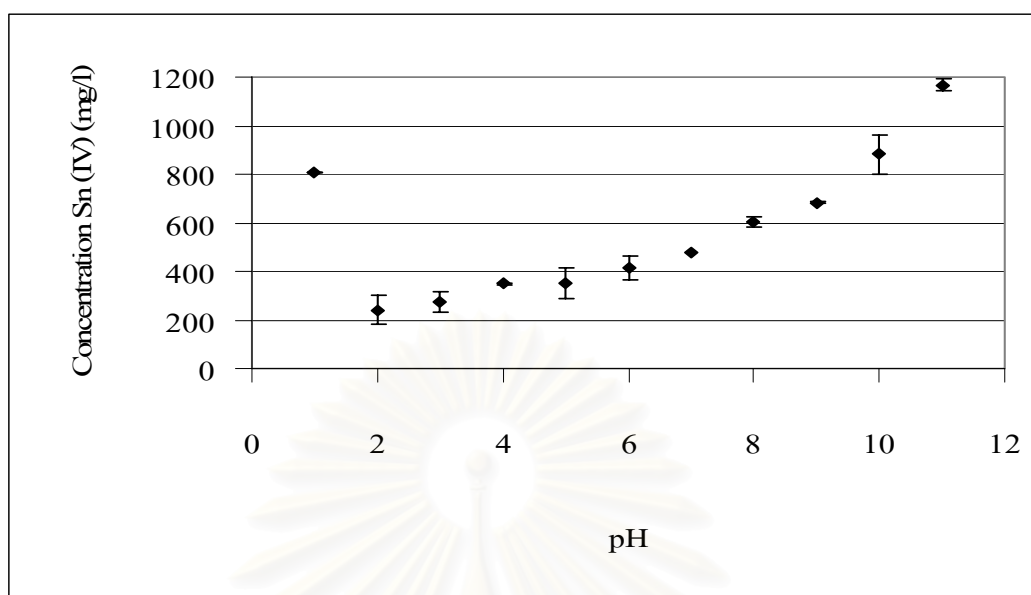


รูปที่ 4.1 ผลการตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

#### 4.1.2 การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์

ในการทดลองนี้จะแปรเปลี่ยนพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีความเข้มข้นดีบุก 0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในขั้นตอนแรก ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีพีเอชเท่ากับ 11 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อหลีกเลี่ยงแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากนั้นจึงใส่โซเดียมซัลไฟด์ให้มีความเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎีจากสมการสมดุลเคมี หลังจากนั้นจึงปรับพีเอชของน้ำเสียให้ได้ตามต้องการด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วตรวจวัดลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง ซึ่งผลการทดลองจะแสดงใน รูปที่ 4.2





รูปที่ 4.2 ผลการตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์  $2 \times 10^{-2}$  M

เมื่อมีการตกตะกอนโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมี  $\text{Sn}^{4+}$  0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอชแตกต่างกันจะมีความสามารถในการละลายแตกต่างกัน โดยที่ความสามารถในการละลายนี้ จะแสดงถึงความสามารถในการตกตะกอน นั่นคือ ณ พีเอชที่มีความสามารถในการละลายต่ำ จะตกตะกอนได้มาก

จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 2  $\text{Sn}^{4+}$  สามารถละลายได้ในน้ำเสียสังเคราะห์  $2.03 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร คิดเป็น 20.32% ดังนั้นจึงสามารถนำกลับดีบุกในรูปตะกอนซัลไฟด์ 79.68% ซึ่งจะอยู่ในรูป  $\text{SnS}_{2(s)}$

สมการการแตกตัวของ  $\text{H}_2\text{S}$  และค่าคงที่ของการแตกตัวเป็นดังนี้

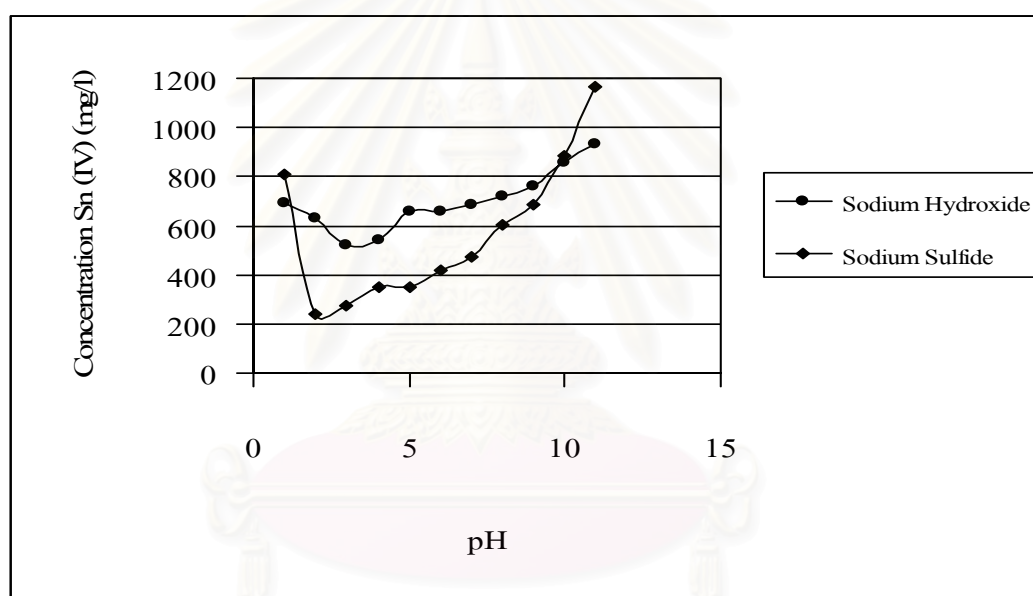


พบว่าไอออน  $\text{Sn}^{4+}$ ,  $\text{SnO}_3^{2-}$  และ  $\text{Sn}(\text{OH})_6^{2-}$  อยู่ในสารละลาย โดยที่  $\text{Sn}^{4+}$  จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีค่าพีเอชสูงขึ้น ส่วน  $\text{SnO}_3^{2-}$  และ  $\text{Sn}(\text{OH})_6^{2-}$  จะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นในสารละลาย เมื่อพีเอชเพิ่มมากขึ้นและเป็นตัวที่ควบคุมความสามารถในการละลายเมื่อพีเอชมากกว่า 4

#### 4.1.3 เปรียบเทียบความสามารถในการละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟ แสดงความสามารถในการละลายของดีบุกที่พีเอชต่างๆ เมื่อตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีแนวโน้ม

ความสามารถในการละลายได้สูงมากกว่าตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ แสดงถึงว่า สามารถนำกลับในรูปของโลหะซัลไฟด์ได้มากกว่า คือ สามารถนำกลับดีบุกได้โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ 56.03% และ 79.68% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน พบว่า การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ต้องปรับค่าพีเอช ให้มีค่าเป็นกรด คือ 2 ซึ่งจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือ แก๊สไข่เน่าขึ้น เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเสียค่าใช้จ่าย 2.85 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่าพีเอช ที่เหมาะสมอยู่ที่ 3 และเสียค่าใช้จ่าย 1.01 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายที่ใช้ คิดจากการปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ (พีเอช 0) ให้ได้ค่าพีเอชที่มีความสามารถในการตกตะกอนได้มากที่สุด



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

สรุป การตกตะกอนดีบุกในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เหมาะสมกว่าโซเดียมซัลไฟด์ ถึงแม้ว่า จะสามารถนำกลับดีบุกได้น้อยกว่า เนื่องจาก ราคาสารเคมีที่ใช้ถูกกว่า และไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม มากเท่า การใช้โซเดียมซัลไฟด์

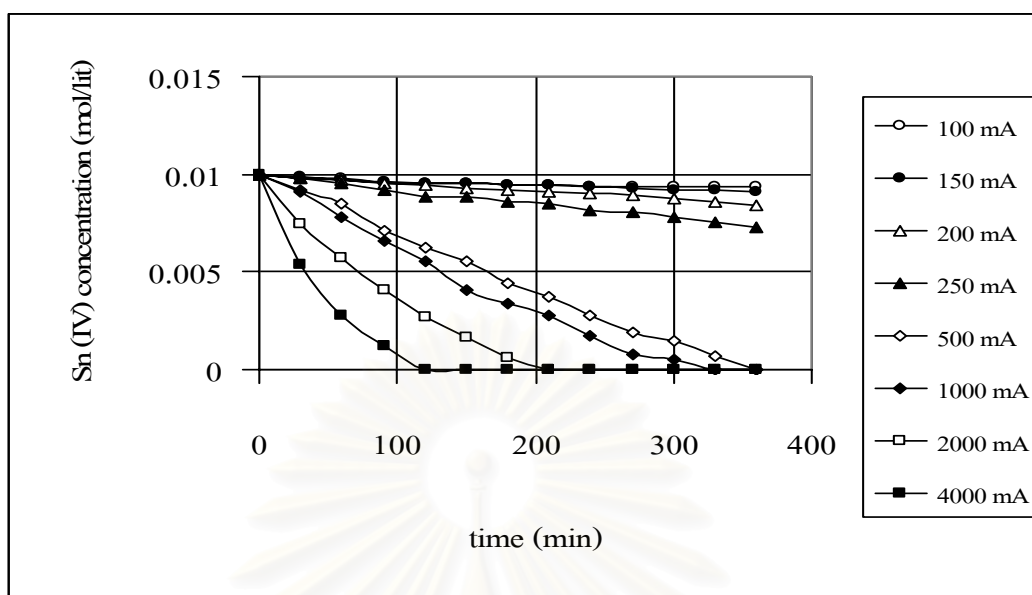
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

pH	โซเดียมไฮดรอกไซด์		โซเดียมซัลไฟด์	
	สารละลายดีบุก เข้มข้น 0.01 M	% recovery	สารละลายดีบุก เข้มข้น 0.01 M	% recovery
1	0.005848	41.58	0.006792	32.05
2	0.005297	47.03	0.002032	79.68
3	0.004395	56.03	0.002296	77.02
4	0.004560	54.39	0.002931	70.70
5	0.005534	44.64	0.002938	70.63
6	0.005546	44.53	0.003516	64.85
7	0.005794	42.04	0.003999	60.02
8	0.006039	39.60	0.005082	49.16
9	0.006412	35.86	0.005754	42.46
10	0.007194	28.00	0.007430	25.65
11	0.007870	21.32	0.009817	1.72

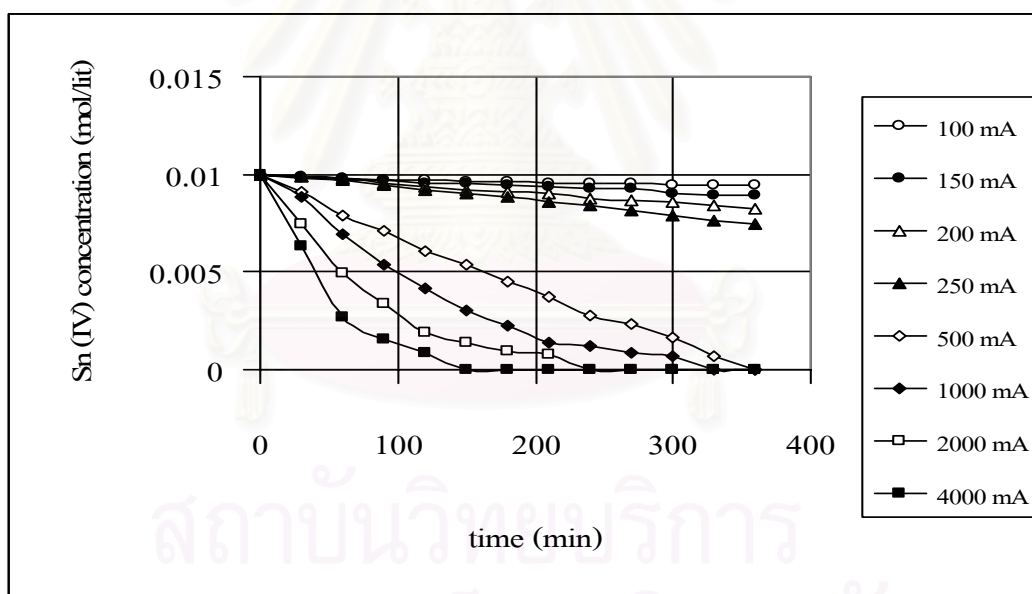
#### 4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

##### 4.2.1 การทดลองหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

การทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด คือ แกรไฟต์ ชุดที่ 2 ขั้วแอโนด คือ แกรไฟต์ ขั้วแคโทด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม และทำการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า 8 ค่า คือ 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 2000 และ 4000 มิลลิแอมแปร์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีความเข้มข้นของดีบุก 0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำการวัดค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นของสารละลายดีบุกเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้กระแสไฟต์เป็นขั้วแคโทด

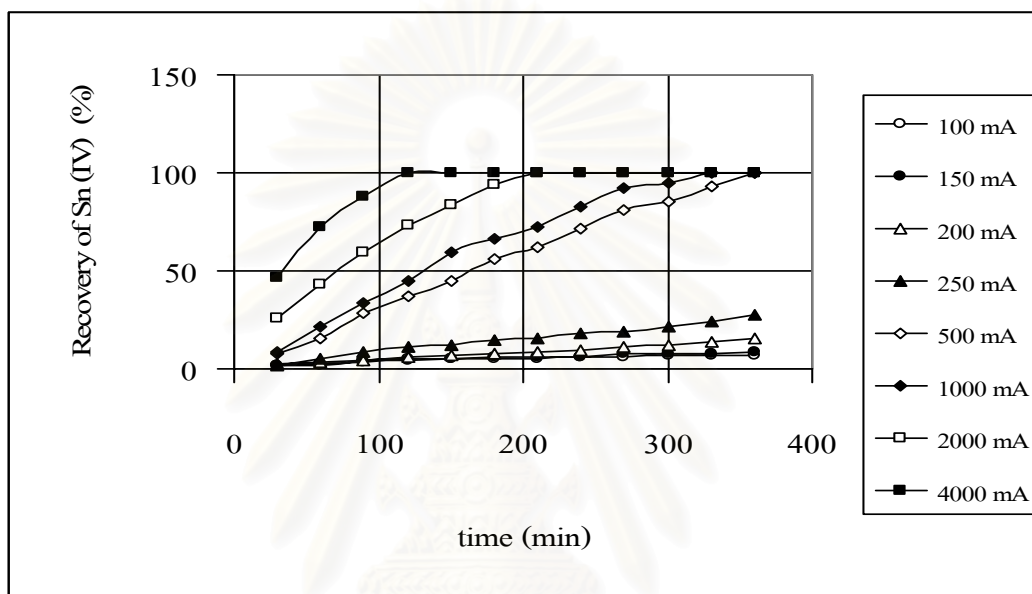


รูปที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นของสารละลายดีบุกเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

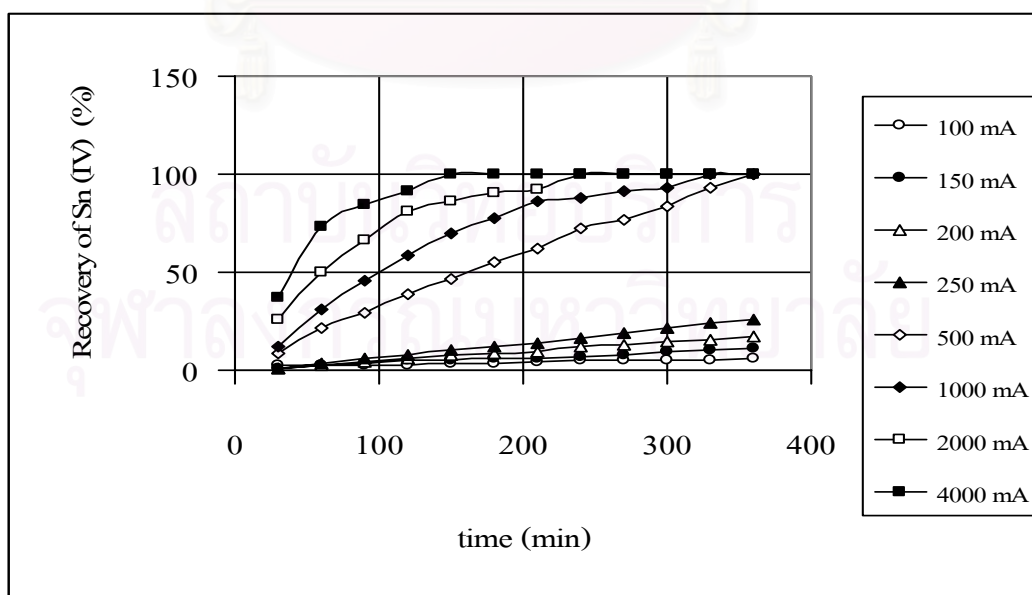
จากผลการทดลอง รูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้า จะมีผลต่อการนำกลับของดีบุก เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การนำกลับดีบุกจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเดียวกันสามารถอธิบายจากกฎฟาราเดย์ได้ นั่นคือ มวลที่ควรจะเกิดปฏิกิริยา จะแปรผันตามเวลาและค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ กล่าวคือ เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น สามารถนำกลับดีบุก

ได้มากขึ้น จึงมีค่าร้อยละการนำกลับคืนสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

โดยร้อยละการนำกลับคืนของขั้วแกรไฟต์และขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ 100 มิลลิแอมแปร์ คือ 6.7% และ 5.9% ที่ 150 มิลลิแอมแปร์ คือ 8.94% และ 10.96% ที่ 200 มิลลิแอมแปร์ 15.47% และ 17.34% ที่ 250 มิลลิแอมแปร์ 27.35% และ 25.47% ที่ 500, 1000, 2000 และ 4000 มิลลิแอมแปร์ คือ 100% ทั้งขั้วแกรไฟต์และขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละการนำกลับคืนของเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด



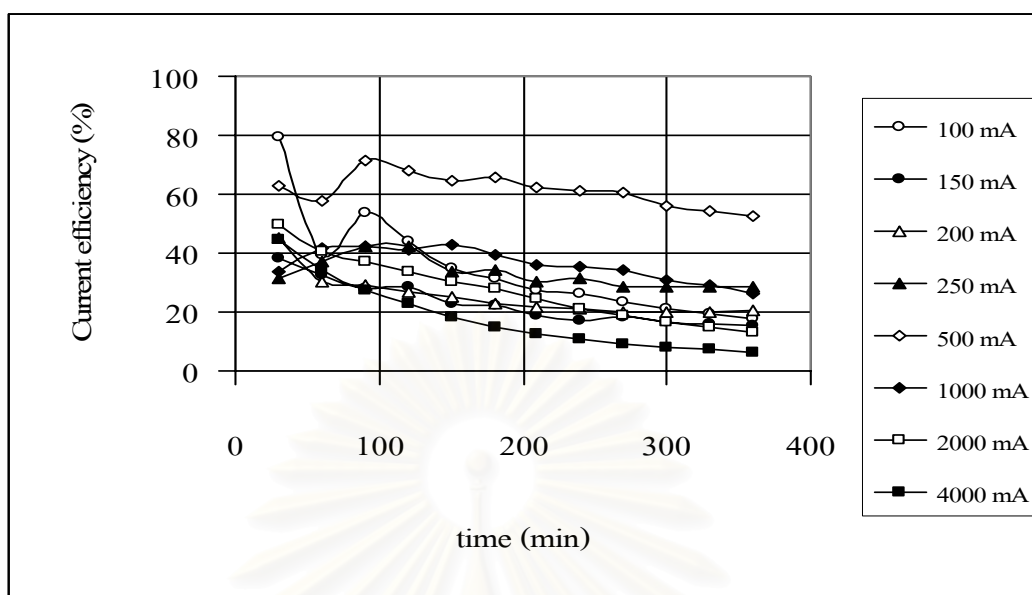
รูปที่ 4.7 ค่าร้อยละการนำกลับคืนของเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

จากรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 จะพบว่า เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะสามารถเพิ่มร้อยละการนำกลับคืนมาได้มากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ดังที่กล่าว การให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าได้ และถ้าน้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา

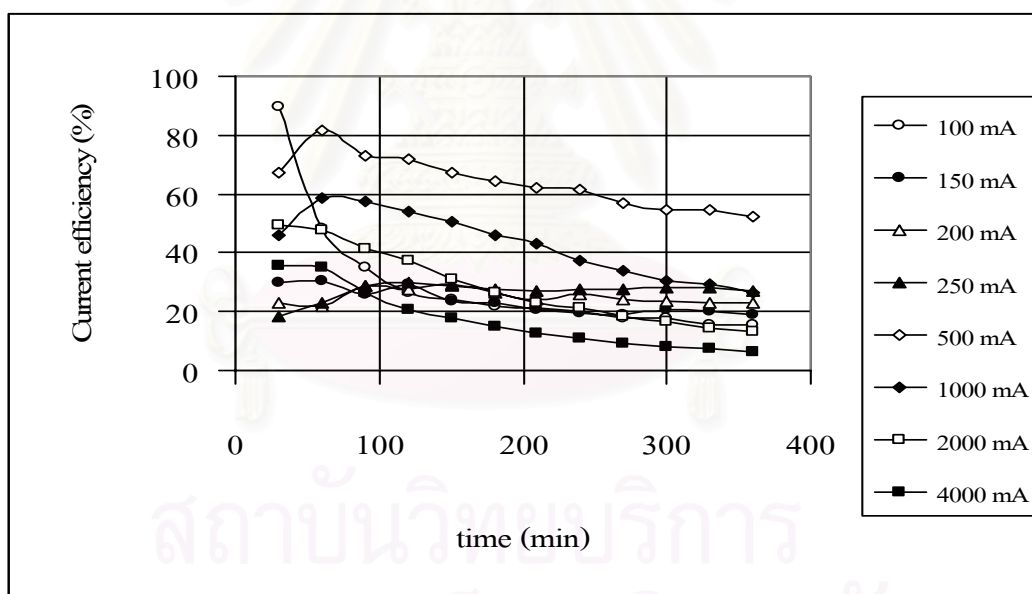
ในการทดลองที่ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ เกิด เพราะมีปริมาณไอออน ถ่ายเทไปที่ขั้วไฟฟ้า ได้เพียงพอกับปริมาณอิเล็กตรอนที่จะเกิดปฏิกิริยา ทำให้ระบบเป็นการควบคุมแบบถ่ายเทไอออน (Charge transfer control) เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็วขึ้น เมื่อค่ากระแสไฟฟ้ามากขึ้น หรือปริมาณอิเล็กตรอนมีมากกว่าปริมาณไอออน ที่แพร่มายังขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาจึงเกิดได้จำกัด เท่าปริมาณไอออนที่แพร่เท่านั้น ทำให้ระบบเป็นการควบคุมแบบถ่ายเทมวล (Mass transfer control) และมีกระแสจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ ทำให้เกิดการสูญเสียไป ของกระแสสำหรับปฏิกิริยาข้างเคียง ( Bard และ Faulker, 1980) จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงการควบคุมแบบถ่ายเทไอออน และลดลงเมื่อเพิ่มค่ากระแส ในช่วงการควบคุมแบบถ่ายเทมวล เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากขึ้น จนเกินค่ากระแสจำกัดของการเกิดปฏิกิริยา กระแสไฟฟ้าส่วนเกินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดแก๊สไฮโดรเจน ที่ขั้วแคโทด หมายความว่า กระแสไฟฟ้าที่ให้สู่ระบบทั้งหมดไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนดีบุกเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลง

ค่ากระแสไฟฟ้าที่เลือก คือ 500, 1000, 2000 และ 4000 มิลลิแอมแปร์ เพราะให้ค่าร้อยละการนำกลับคืนได้ดีที่สุด คือ 100% ดังนั้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับคืน จากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี จึงต้องมีการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกระแสของแต่ละค่ากระแสไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงกระแสและเวลา เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด



รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงกระแสและเวลา เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

จาก รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส 52.54% และ 52.54% ที่ขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ณ ชั่วโมงที่ 6 ตามลำดับ และสามารถนำกลับคืนมาได้ 100% ในรูปของโลหะบริสุทธิ์

เมื่อเปรียบเทียบ ชนิดของขั้วแคโทดที่ใช้ในการทดลอง คือ แกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยที่ตัวแปรต่างๆ เหมือนกันหมด จะพบว่า ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถนำกลับคืนมาได้ใกล้เคียง

กับขั้วแกรไฟต์ โดยให้ค่าร้อยละการนำกลับได้ 100% ณ ชั่วโมงที่ 6 จึงอาจกล่าวได้ว่า ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมและขั้วแกรไฟต์ ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนนั้น มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาราคาของขั้วไฟฟ้า จะพบว่า เหล็กกล้าไร้สนิม 304 มีราคาสูงกว่า เมื่อใช้แกรไฟต์ คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 6.5×12 ตารางเซนติเมตร ราคา 5 บาท (4 ฟุต×8ฟุต ราคา 1720 บาท) แกรไฟต์ ขนาด 6.5×12 ตารางเซนติเมตร แบ่งขาย 300 บาท แต่แกรไฟต์สามารถใช้งานได้บ่อยครั้งมากกว่า เนื่องจากเป็นวัสดุเนื้อที่ทนกรด ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อใช้งานเสร็จ จะเกิดคราบสนิมที่ผิววัสดุ แต่สามารถขัดออกได้ง่าย เนื่องจากไม่ได้กัดไปถึงเนื้อในของเหล็ก

สรุปสถานะที่เหมาะสมในการนำกลับดีบุกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี คือ ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะเวลา 6 ชั่วโมง สามารถนำกลับได้ 100%

Garcia-Gabaldon และคณะ, 2006 ได้ทำการศึกษาการนำกลับของดีบุกจากสารละลาย โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ดำเนินการโดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า ถึงปฏิกิริยาถูกแบ่งเป็นสองช่องโดยไดอะแฟรมเซรามิก พบว่าค่ากระแสที่เหมาะสมคือ 200 มิลลิแอมแปร์

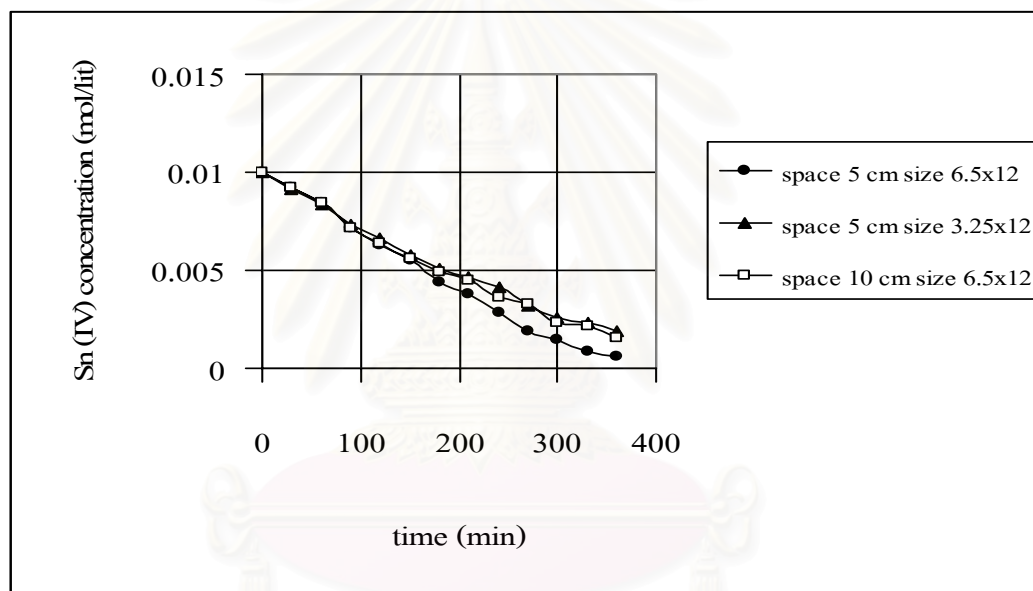
**ตารางที่ 4.2** แสดงค่าร้อยละการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อใช้ขั้วแกรไฟต์และขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

ค่ากระแสไฟฟ้า (mA)	ร้อยละการนำกลับดีบุก ณ ชั่วโมงที่ 6 ในน้ำเสียสังเคราะห์		ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส ณ ชม ที่ 6 (ร้อยละ)	
	แกรไฟต์	เหล็กกล้าไร้สนิม	แกรไฟต์	เหล็กกล้าไร้สนิม
100	6.70	5.90	17.59	15.49
150	8.94	10.96	15.65	19.19
200	15.47	17.34	20.32	22.77
250	27.35	25.47	28.74	26.77
500	100.00	100.00	52.54	52.54
1000	100.00	100.00	26.27	26.27
2000	100.00	100.00	13.13	13.13
4000	100.00	100.00	6.57	6.57

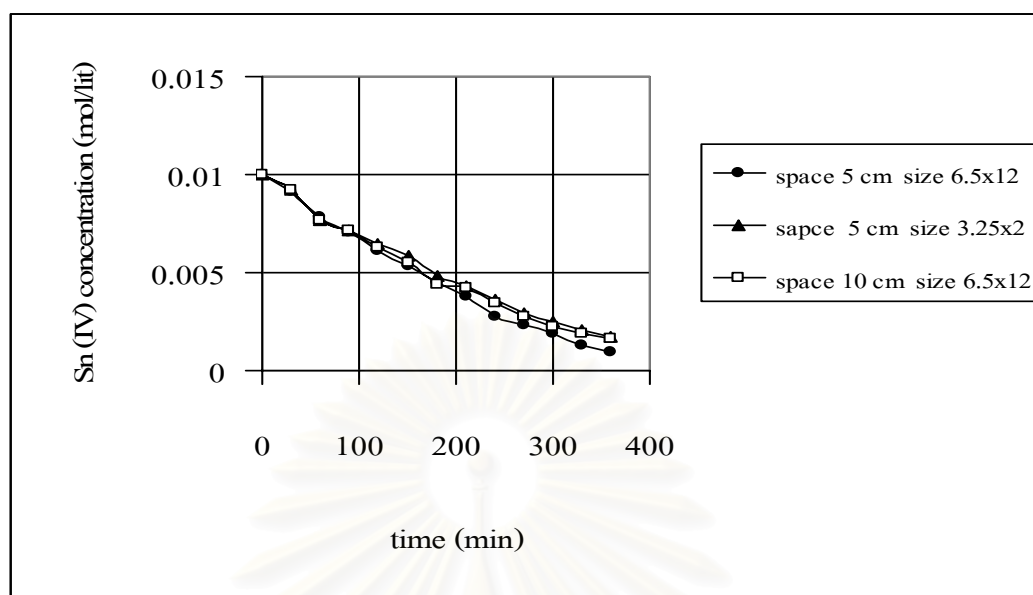


#### 4.2.2 การทดลองหาขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ในน้ำเสียดังเคราะห์ที่มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด แตกต่างกัน 2 ค่า คือ  $3.25 \times 12$  ตารางเซนติเมตร และ  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร ทำการทดลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ชุด ชุดที่ 1 ขั้วแอโนด และ ขั้วแคโทด คือ แกรไฟต์ ชุดที่ 2 ขั้วแอโนด คือ แกรไฟต์ ขั้วแคโทด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร ทำการวัดค่าความเข้มข้นที่เหลือในสารละลาย ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11



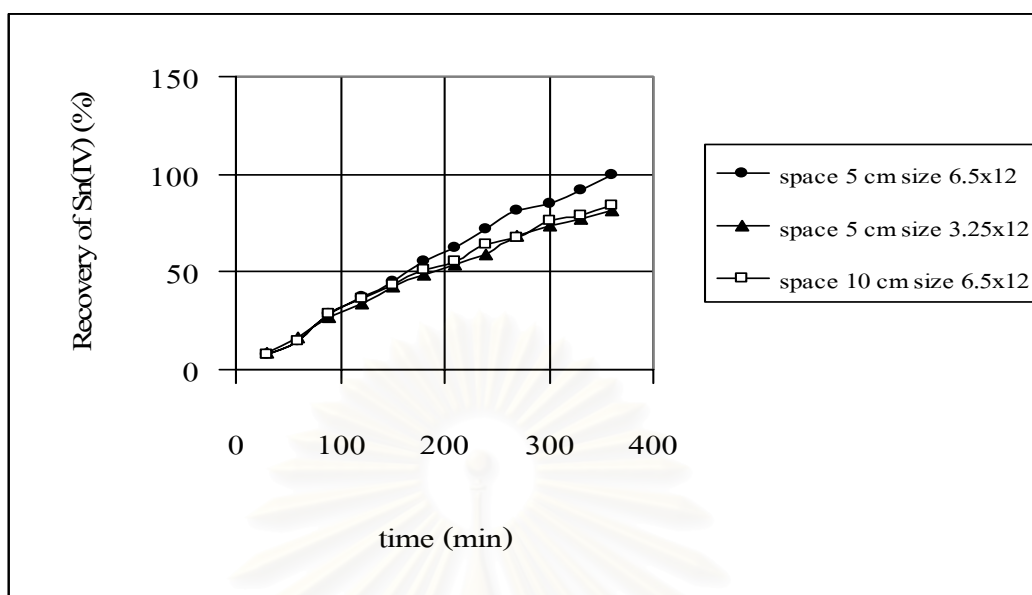
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด



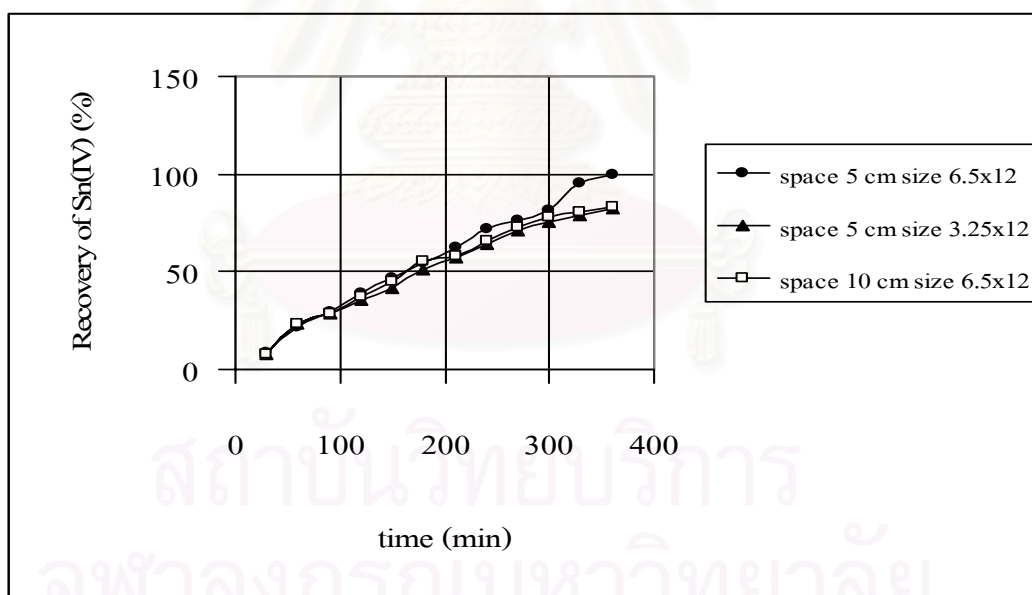
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13 พบว่า เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ คือ 500 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 3.25x12 ตารางเซนติเมตร ที่ขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ให้ค่าการนำกลับที่ชั่วโมงที่ 6 คือ 81.13% และ 82.43% ตามลำดับ ซึ่ง เมื่อเทียบกับพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 6.5x12 ตารางเซนติเมตร ที่ขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ให้ค่าการนำกลับ ชั่วโมงที่ 6 คือ 100% และ 100% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบ พื้นที่หน้าตัดจาก 3.25x12 ตารางเซนติเมตร และ 6.5x12 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร จะพบว่า ประสิทธิภาพในการนำกลับดีบุกเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้พื้นที่ ที่มีขนาดใหญ่กว่า เพราะ ค่าความต้านทานของตัวนำใดๆ เป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้านั้น จากสมการ  $R = \frac{L}{C \times A}$  ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้า เมื่อพื้นที่เพิ่มมากขึ้น จะมีพื้นที่ของการถ่ายเทอิเล็กตรอนมากขึ้น ทำให้อัตราการรับและให้อิเล็กตรอน ที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ก็จะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถนำกลับดีบุกได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัด ที่ระยะห่างเท่าเดิม



รูปที่ 4.12 ค่าร้อยละการนำกลับคืนนิกเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและระยะห่างต่างๆ เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด



รูปที่ 4.13 ค่าร้อยละการนำกลับคืนนิกเมื่อเทียบกับเวลา ที่ขนาดและระยะห่างต่างๆ เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

โดยสรุป สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองทางไฟฟ้าเคมี คือ กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร พื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถนำกลับคืนมาได้ 100% ทั้งขั้วแคโทดแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ณ ชั่วโมงที่ 6

#### 4.2.3 การทดลองหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

การทดลองนี้ ได้ทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีความเข้มข้นดีบุก 0.01 โมลต่อลิตร ทดลองที่ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ค่า คือ 5 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยทำการทดลอง 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดที่ 1 ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด คือ แกรไฟต์ ชุดที่ 2 ขั้วแอโนด คือ แกรไฟต์ และ ขั้วแคโทด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ทำการวัดค่าความเข้มข้นที่เหลือในสารละลาย ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.13

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร ที่ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม พื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร จะสามารถนำกลับคืนมาได้ 100% และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 10 เซนติเมตร ที่ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม จะสามารถนำกลับคืนมาได้ 84.45% และ 83.53% ตามลำดับ พบว่า ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าใกล้เคียงกันมากกว่า จะสามารถนำกลับคืนได้ดีกว่า จากสมการ  $R = \frac{L}{C \times A}$  ดังที่กล่าวในบทที่ 2 และจากกฎของโอห์ม ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า มีผลทำให้ความต่างศักย์ไฟฟาระหว่างเซลล์เปลี่ยน นั่นคือเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดลดลง จะมีผลทำให้ความต่างศักย์ลดลง เนื่องมาจากความต้านทานของสารละลายลดลง ในการทดลอง เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า 5 เซนติเมตร พบว่าเกิดการชนกันระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองในระยะที่น้อยกว่า 5 เซนติเมตรได้

#### 4.2.4 สรุปผลการทดลองทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์

สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับคืนของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสที่ 64 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร ผลการทดลองจากการใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ชนิดพบว่า ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถทำให้เกิดการนำกลับคืนของดีบุกได้ในปริมาณใกล้เคียงกับขั้วแกรไฟต์ ณ ชั่วโมงที่ 6 แต่ราคาถูกกว่า จึงมีความเหมาะสมมากกว่าที่จะใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม ทำการทดลองในน้ำเสียจริง

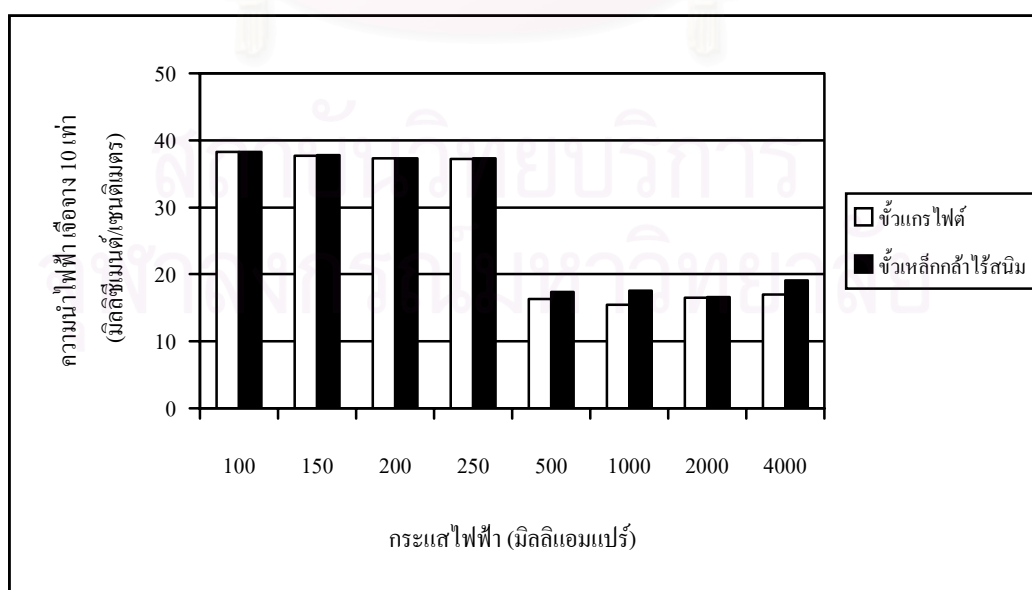
ใช้พลังงานไฟฟ้า 8.25 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ค่าไฟฟ้า 24.37 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละการนำกลับคืนของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ขนาดและพื้นที่ต่างๆ

ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (เซนติเมตร)	ร้อยละการนำกลับคืน			
	3.25×12 cm		6.5×12 cm	
	แกรไฟต์	เหล็กกล้าไร้สนิม	แกรไฟต์	เหล็กกล้าไร้สนิม
5	81.13	82.43	100.00	100.00
10	ไม่มี	ไม่มี	84.45	83.53

#### 4.2.5 ความนำไฟฟ้า

น้ำเสียสังเคราะห์ เริ่มต้นการทดลองมีค่าความนำไฟฟ้าเฉลี่ย ประมาณ 43 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า แต่หลังจากผ่านการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ด้วยค่ากระแสไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้า ดังการทดลองที่ 2 จะพบว่า ค่าความนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้า 100-250 มิลลิแอมแปร์ ประมาณ 38 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า ค่ากระแสไฟฟ้า 500-4000 มิลลิแอมแปร์ ประมาณ 17 มิลลิซีเมนต์ เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า



รูปที่ 4.14 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์

แนวโน้มของค่าความนำไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อมีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ เพราะปริมาณไอออนดีบุกในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการไปเกาะของไอออนที่ขั้วไฟฟ้า และปริมาณไอออนมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้า คือ ถ้าปริมาณไอออนมีค่าลดลง ค่าความนำไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2545)

จากผลการทดลอง ค่าความนำไฟฟ้าของวิธีการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ที่ใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด มีค่าใกล้เคียงกับที่ใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองจากการทดลองที่ 4.2 นั่นคือ ความสามารถในการนำกลับดีบุก เมื่อใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วแกรไฟต์ ใกล้เคียงกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.3 การทดลองที่ 3 การนำกลับคืนของน้ำเสียจริงด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

#### 4.3.1 คุณสมบัติของน้ำเสีย

น้ำเสียจริงที่เก็บมาจากส่วนของระบบบำบัดอากาศ ชนิด Scrubber จากโรงงานโลหะบัดกรีแห่งหนึ่ง โดยที่น้ำเสียที่เก็บมามีลักษณะสีเหลืองขุ่น และประกอบด้วยโลหะหนักสำคัญ คือ ดีบุกและตะกั่ว

กรรมวิธีในการบำบัดฝุ่นจากเตาหลอมโลหะ จะทำโดยการผ่านม่านน้ำ ให้ชะเอาฝุ่นที่เกิดจากการหลอมตกลงสู่บ่อเก็บ ซึ่งในการวิจัยจะเก็บน้ำในส่วนนี้

จากการทำการวิเคราะห์หาปริมาณดีบุกในน้ำเสียเริ่มต้น พบว่ามีปริมาณดีบุก 2-7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าดีบุกน้อยมาก จึงใช้เมทริกซ์น้ำเสียเดิมแล้วเติมดีบุกเพิ่ม ให้มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) เพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงได้ชัดเจน

#### ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง (ก่อนการเติมดีบุกเพิ่ม)

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้
pH	7.46
TDS 103°C (mg/l)	7302
ความขุ่น (NTU)	8
ความนำไฟฟ้า (ms/cm)	5.68
SS (mg/l)	2
Cu (mg/l)	0.04
Sn (mg/l)	2
Pb (mg/l)	1.41
Zn (mg/l)	0.49



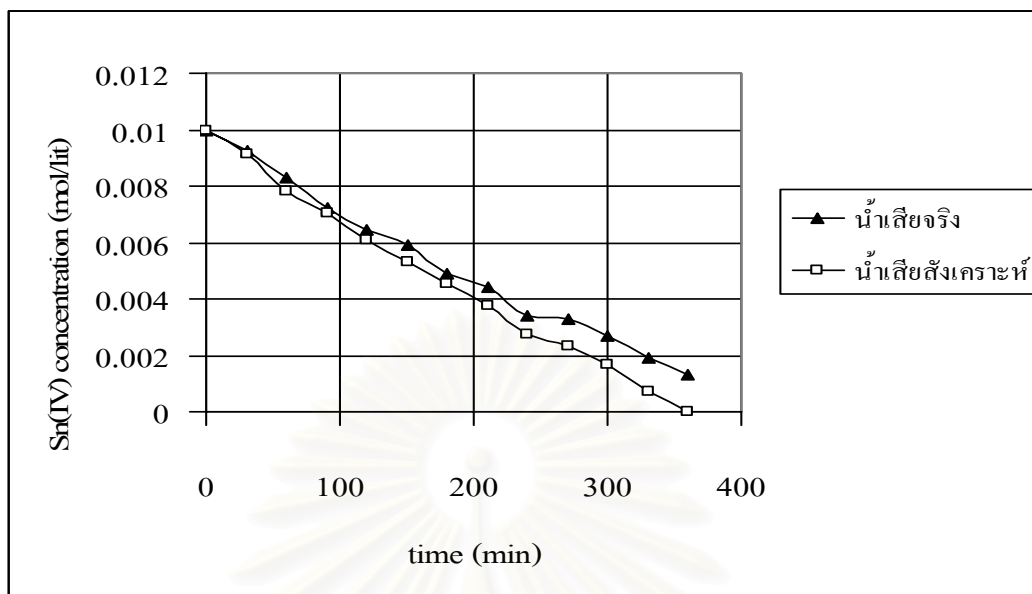
รูปที่ 4.15 รูปน้ำเสียที่เก็บจากระบบบำบัดอากาศแบบ Scrubber ของ โรงงานโลหะบัดกรีแห่งหนึ่ง

#### 4.3.2 ผลการนำกลับดีบุกเมื่อนำน้ำเสียจริง

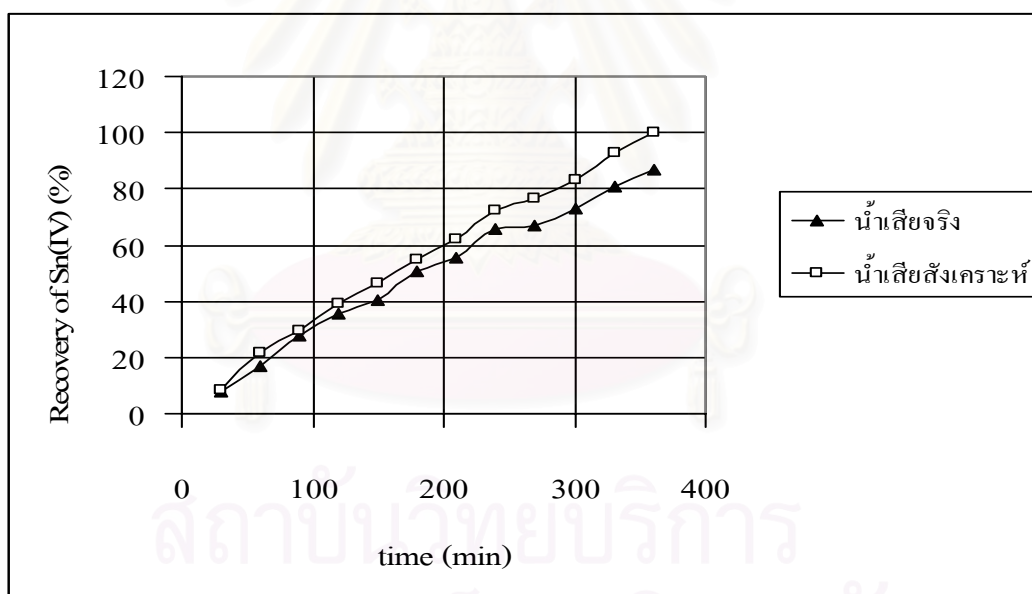
เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีบุกโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ดังผลการทดลองที่ 2 พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร หรือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 64 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร โดยใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้า คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด พบว่านำกลับดีบุกได้ 100% จากนั้น เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์มาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง จะได้ผลการทดลองแสดงใน รูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18

จากผลการทดลองพบว่า สามารถนำกลับดีบุกได้ 86.86% โดย ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส 45.64% พบว่า ความสามารถในการนำกลับมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจาก ในน้ำเสียจริงจะมีสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น ไอออนของโลหะตะกั่ว คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของตะกั่วและดีบุก (Scott และคณะ, 1997) คือ -0.125 โวลต์ และ -0.136 โวลต์ ตามลำดับ จึงเกิดการแย่งกันรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด อีกทั้งมีความขุ่นที่มากกว่า และไอออนอื่นในสารละลายปนเปื้อนมากกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลาริเซชัน นั่นคือ เกิดการไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ในสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นไปยุ่งยากมากขึ้น

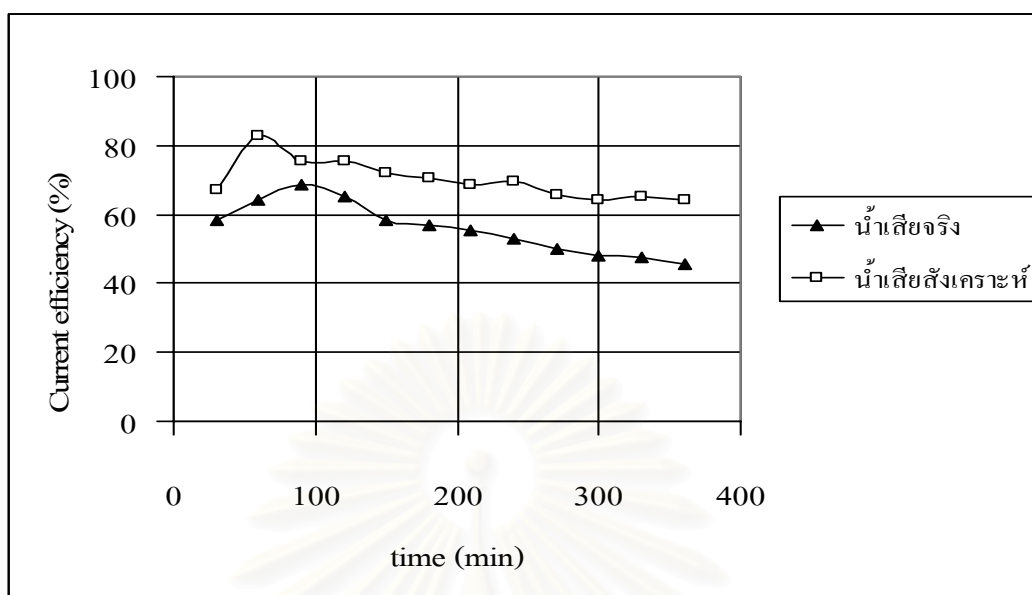




รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นดินบุกกับเวลา เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการนำกลับดินบุก เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

เมื่อเปรียบเทียบการนำกลับคืนกับค่าทางทฤษฎี คำนวณตามกฎของฟาราเดย์ พบว่า มีค่าการนำกลับ 100% ณ เวลาที่ 2 ชั่วโมง 30 นาที เนื่องจากค่าทางทฤษฎีนั้น เป็นค่าทางอุดมคติ แต่เมื่อทำการทดลองจริง จะพบว่า มีผลกระทบจาก คุณสมบัติของน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ใช้พลังงานไฟฟ้า 3.67 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ค่าไฟฟ้า 10.84 บาทต่อลบ.ม

ตารางที่ 4.5 ผลเปรียบเทียบการนำกลับดีบุกของน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียจริงและค่าทางทฤษฎี ที่กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ชั่วแคโทดเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาที)	น้ำเสียจริง				น้ำเสียสังเคราะห์				ค่าทางทฤษฎี ตามกฎของฟาราเดย์ (กรัม)
	Sn(IV) mol/lit	Ø (%) @ 6 hr	RECOVERY (%)	ดีบุกที่นำกลับได้ (กรัม)	Sn (IV) mol/lit	Ø (%) @ 6 hr	RECOVERY (%)	ดีบุกที่นำกลับได้ (กรัม)	
0	0.010000				0.010000				
30	0.009241	58.53	7.58	0.09	0.009133	66.96	8.67	0.10	0.27
60	0.008309	64.16	16.90	0.20	0.007849	81.65	21.51	0.25	0.55
90	0.007247	68.48	27.52	0.32	0.007069	72.92	29.31	0.34	0.83
120	0.006446	65.16	35.53	0.42	0.006096	71.57	39.04	0.46	1.10
150	0.005938	58.53	40.61	0.48	0.005342	67.13	46.58	0.55	1.18
180	0.004919	57.00	50.80	0.60	0.004525	64.58	54.75	0.64	1.18
210	0.004438	55.20	55.61	0.66	0.003762	61.92	62.39	0.74	1.18
240	0.003398	53.00	66.02	0.78	0.002762	61.70	72.38	0.85	1.18
270	0.003285	49.92	67.14	0.79	0.002346	56.90	76.54	0.90	1.18
300	0.002715	47.80	72.84	0.86	0.001672	54.65	83.28	0.98	1.18
330	0.001906	47.34	80.93	0.96	0.000705	54.36	92.95	1.10	1.18
360	0.001314	45.64	86.86	1.03	0.000000	52.54	100.00	1.18	1.18

### 4.3.3 ความนำไฟฟ้า

เนื่องจากน้ำเสียจริง ค่าความนำไฟฟ้า 5.68 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จึงต้องเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า และเนื่องจากการเติมกรดแก่ก็เป็นการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าได้ อีกทั้ง จำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำเสียจริงให้มีค่าต่ำกว่า 1 เพื่อให้ได้น้ำที่คอกที่เดิมเข้าไป 0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถละลายได้ทั้งหมด และที่พีเอชต่ำกว่า 1 นั้น จะไม่ทำให้เกิดแข็งซ้นของคอกและเกิดเป็นไอออนของคอก (Mordechay และ Milan, 2000)

จากการเติมกรดไฮโดรคลอริกในน้ำเสียจริงให้มีพีเอช เท่ากับ ศูนย์ แล้ว จะมีค่าความนำไฟฟ้า 18.02 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า หลังจากทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ณ ชั่วโมงที่ 6 ทำการวัดค่าความนำไฟฟ้า เท่ากับ 7.60 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับค่าความนำไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ คือมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่เวลามากขึ้น ความสามารถในการนำกลับคอกจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วย

### 4.3.4 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

จากผลการทดลองสภาวะที่มีความเหมาะสม นำมาศึกษาค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้ คำนวณค่าสารเคมีที่ต้องใช้ในการตกตะกอน และคำนวณค่าไฟฟ้าที่ต้องใช้ในวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการนำกลับคอก โดยการตกตะกอนทางเคมีกับวิธีทางไฟฟ้าเคมี (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก)

#### 4.3.4.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ในการตกตะกอนคอกใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ ค่าสารเคมีสำหรับการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.01 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสารเคมีสำหรับการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ เท่ากับ 2.85 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยคิดราคาสารเคมีที่ใช้ปรับให้ได้พีเอชตามที่ต้องการ เมื่อเริ่มต้นการทดลองที่พีเอช 0

#### 4.3.4.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเคมี

เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้ามีค่าใช้จ่าย เท่ากับ 10.84 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด จะคำนวณเฉพาะค่าไฟฟ้า ไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนทั้งหมดในการบำบัด เพราะการทดลองนี้เป็นการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติมากน้อยแค่ไหน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนทางเคมี และการทดลองทางไฟฟ้าเคมี พบว่าวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า 10.84 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้เสียค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดมากกว่าการตกตะกอนทางเคมี ประมาณ 8 บาทต่อลูกบาศก์เมตร แม้ว่าวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงมาก แต่ก็สามารถนำกลับได้ 100% และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ถ้านำมาใช้ประโยชน์ ก็น่าจะทำให้เกิดผลตอบแทนที่คุ้มค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียไป งานวิจัยนี้ถ้าพิจารณาในด้านคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแล้ว งานวิจัยนี้ให้ประโยชน์อย่างมาก เพราะเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ซึ่งแนวทางนี้ในต่างประเทศให้ความสนใจมาก ซึ่งคาดว่าแนวทางนี้น่าจะเป็นที่สนใจของประเทศไทยมากขึ้น การลงทุนแม้ว่าจะต้องเสียค่าใช้จ่าย แต่เป็นการลงทุนที่คุ้มค่า และมีประโยชน์ระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการนำกลับคืนของ โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยทำการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

1. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร พบว่าสามารถตกตะกอนได้ดีที่สุดที่ พีเอช 3 ดีบุกมีความสามารถในการละลายต่ำที่สุด คือ  $4.4 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร และสามารถนำกลับคืนได้ 56.03%
2. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์เข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร พบว่าสามารถตกตะกอนได้ดีที่สุดที่ พีเอช 2 ดีบุกมีความสามารถในการละลายต่ำที่สุด คือ  $2.03 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร และสามารถนำกลับคืนได้ 79.68%
3. การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับคืนได้ดี เนื่องจากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของดีบุก 0.01 โมลต่อลิตร (1180 มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถนำกลับคืนได้ 100% ที่ชั่วโมงที่ 6 เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตร และพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 64 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้งขั้วแคโทดแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม
4. ขั้วแกรไฟต์และขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม ให้ค่าการนำกลับคืนได้ 100% ในน้ำเสียสังเคราะห์ แต่เนื่องจากราคาของเหล็กกล้าไร้สนิมสูงกว่าแกรไฟต์ จึงมีความเหมาะสมมากกว่าที่จะนำไปใช้กับน้ำเสียจริง
5. การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีสำหรับน้ำเสียจริง สามารถนำกลับคืนได้ 86.86% ณ ชั่วโมงที่ 6 โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด และขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด ที่ค่า

กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 เซนติเมตรและพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร

6. พลังงานที่ใช้โดยวิธีการทดลองทางไฟฟ้าเคมี คือ 3.67 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ค่าไฟฟ้าประมาณ 10.84 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าใช้จ่ายที่คิดไม่รวมค่าเครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ปรับ
7. ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เริ่มต้นประมาณ 43 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า เมื่อทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ค่าความนำไฟฟ้าลดลง มีค่าประมาณ 17.32 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า
8. ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียจริง เริ่มต้น 5.68 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ทำการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก จนกระทั่งค่าความนำไฟฟ้า เท่ากับ 18.02 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า เมื่อทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ค่าความนำไฟฟ้าลดลงมีค่า 7.60 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิธีทางไฟฟ้าเคมี จะมีประสิทธิภาพในการนำกลับดีบุกได้ดี แต่ต้องมีการปรับปรุงเรื่องสภาพความเป็นกรดของน้ำเสียหลังการทดลอง
2. เสนอให้ศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อการนำกลับดีบุกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี
3. เสนอให้ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนในการทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี
4. การทดลองนี้เป็นพื้นฐานในการนำกลับดีบุก สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโลหะมีค่าอื่นๆ และนำไปทดลองในระดับที่ใหญ่ขึ้น เพื่อสามารถนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้จริง

### 5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

1. การนำไปใช้ประโยชน์ จากการทดลองจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมได้ ค่าที่ได้ คือ Current density ค่าที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปขยายสเกลต่อในการใช้ประโยชน์ทางโรงงานต่อไป
2. การขยายสเกล (Scale up) สิ่งที่ต้องระวังก็คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัด (Current density) และ พื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell volume ratio) โดยจะทำการใช้ค่า Current density ที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัย ไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการนำกลับ และใช้ค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย ให้มีค่าเท่ากัน (Cameselle และคณะ, 2005)



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตินราการพิมพ์, 2539.
- ขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- ปริเมษ เจริญนพคุณ. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2545.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- มะลิ หุ่นสม. การนำทองแดง โครเมียมและนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- มันสิน ตันจุลเวสน์. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- หทัยทัต ชื้อสุวรรณ. การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- อินทรา หาญพงษ์พันธ์. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

### ภาษาอังกฤษ

- Bard, A. J., and Faulker, L. R. Electrochemical Methods Fundamentals and Applications. New York: John Wiley & Sons Inc, 1980.

- Benjamin, M.M. Water chemistry. Singapore: McGraw Hill Book, 2002.
- Boskovic, I., Mentus, S.V., and Pjescic, M. Electrochemical behavior of an Ag/TiO<sub>2</sub> composite surfaces. Electrochimica Acta 51 (2006): 2793-2799.
- Cameselle, C., Pazos, M., and Sanroman, M.A. Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimisation and scale-up. Chemosphere 60 (2005): 1080-1086.
- Carlos, I. A., Bidoia, E. D., Pallone, E. M. J. A., Almeida, M. R. H., and Souza, C.A.C. Effect of tartrate content on aging and deposition condition of copper-tin electrodeposits from a non-cyanide acid bath. Surface and Coatings Technology 157 (2002): 14-18.
- Paul Chen, J., and Lim, L.L. Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. Chemosphere 60 (2005): 1384-1392.
- Fourcade, F., and Tzedakis, T. Study of the mechanism of the electrochemical deposition of silver from an aqueous silver iodide suspension. Journal of Electroanalytical Chemistry 493 (2000): 20-27.
- Freeman, H.M. Handbook of hazardous waste treatment and disposal. USA: McGraw Hill Book, 1989.
- Fuerstenau, M. C., and Wang, G. Selective separation of tin from a chloride leach solution. Hydrometallurgy 46 (1997): 229-234.
- Garcia-Gabaldon, M., Perez-Herranz, V., Garcia-Anton, J., and Guinon, J. L. Electrochemical recovery of tin and palladium from the activating solutions of the electroless plating of polymers Potentiostatic operation. Separation and Purification Technology 45 (2005): 183-191.
- Garcia-Gabaldon, M., Perez-Herranz, V., Garcia-Anton, J., and Guinon, J. L. Electrochemical recovery of tin from the activating solutions of the electroless plating of polymers Galvanostatic operation. Separation and Purification Technology xxx (2006): xxx-xxxx.
- Holt, G., and Pearson, D. Process for recovering of tin from low-grade concentrates institute of mining and metallurgy. Hydrometallurgical (1997): 77-81
- Manahan, S.E. Fundamentals of environmental Chemistry. Boca Raton, Fla.: Lewis, 1993.
- Maykuth, D.J. Tin and tin alloys. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology 23, 1983.
- Northland Community and Technical College. Solubility products. Available from: [http://www.northland.cc.mn.us/chemistry/solubility\\_products.htm](http://www.northland.cc.mn.us/chemistry/solubility_products.htm) [2005, August 17].

- Patterson, J.W. Industrial wastewater treatment technology. Boston: Butterworth Publisher, 1985.
- Paul Chen, J., and Lim, L. L. Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. Chemosphere 60 (2005): 1384-1392.
- Reyes-Cruz, V., Ponce-de-Leon, C., Gonzalez, I., and Oropeza, M. T. Electrochemical deposition of silver and gold from cyanide leaching solutions. Hydrometallurgy 65 (2002): 187-203.
- Rochow, E.G., and Abel, E.W. The chemistry of germanium, tin and lead. Oxford: Pergamon Press, 1973.
- Schlesinger, M., and Paunovic, M. Modern electroplating. New York: Wiley, 2000.
- Scott, K., Chen, X., Atkinson, J.W., Todd, M., and Armstrong, R.D. Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards. Conservation and Recycling 20 (1997): 43-55.
- Spizer, M., and Bertazzoli, R. Selective electrochemical recovery of gold and silver from cyanide aqueous effluents using titanium and vitreous carbon cathodes. Hydrometallurgy 74 (2004): 233-242.
- Starowicz, M., Stypula, B., and Banas, J. Electrochemical synthesis of silver nanoparticle. Electrochemistry Communications 8 (2006): 227-230.
- Wentz, C.A. Hazardous waste management. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1989.
- Wright, P.A. Extractive Metallurgy of Tin. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- Xu, Q., Schwandt, C., and Fray, D. J. Electrochemical investigation of lithium and tin reduction at a graphite cathode in molten chlorides. Journal of Electroanalytical Chemistry 562 (2004): 15-21.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

pH	ครั้งที่1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	log C	% recovery	SD
1	693.43	693.43	693.43	693.43	0.005841	-2.233	41.58	0.00
2	611.12	567.50	707.66	628.76	0.005297	-2.276	47.02	58.56
3	582.93	307.54	675.14	521.87	0.004396	-2.357	56.03	156.16
4	552.92	338.13	733.06	541.37	0.004560	-2.341	54.39	161.44
5	604.88	257.87	709.43	657.16	0.005536	-2.257	44.63	52.27
6	605.08	382.95	711.72	658.40	0.005546	-2.256	44.53	53.32
7	649.53	256.32	726.48	688.01	0.005796	-2.237	42.03	38.48
8	671.30	371.33	762.50	716.90	0.006039	-2.219	39.60	45.60
9	764.27	385.09	758.37	761.32	0.006413	-2.193	35.86	2.95
10	835.67	446.33	873.61	854.64	0.007200	-2.143	28.00	18.97
11	942.11	659.24	925.70	933.91	0.007867	-2.104	21.32	8.21

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์

pH	ครั้งที่1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	log C	% recovery	SD
1	806.52	806.52	806.52	806.52	0.006795	-2.168	32.05	0.00
2	176.90	225.56	321.27	241.24	0.002032	-2.692	79.68	59.97
3	228.63	261.94	327.81	272.79	0.002298	-2.639	77.02	41.21
4	230.28	351.83	343.79	347.81	0.002930	-2.533	70.70	4.02
5	260.77	372.17	412.91	348.62	0.002937	-2.532	70.63	64.31
6	148.30	466.08	368.33	417.21	0.003515	-2.454	64.85	48.88
7	282.40	1036.74	474.56	474.56	0.003998	-2.398	60.02	0.00
8	285.12	583.02	623.85	603.44	0.005084	-2.294	49.16	20.42
9	515.35	680.69	685.22	682.96	0.005754	-2.240	42.46	2.26
10	774.59	910.05	963.00	882.55	0.007435	-2.129	25.65	79.34
11	1141.90	1191.25	-	1166.58	0.009828	-2.008	1.72	24.68

ตารางที่ ก.3 เปรียบเทียบการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

pH	โซเดียมไฮดรอกไซด์		โซเดียมซัลไฟด์	
	log C	% recovery	log C	% recovery
1	-2.233	41.58	-2.168	32.05
2	-2.276	47.02	-2.692	79.67
3	-2.357	56.03	-2.639	77.01
4	-2.341	54.39	-2.533	70.69
5	-2.257	44.63	-2.532	70.63
6	-2.256	44.53	-2.454	64.85
7	-2.237	42.03	-2.398	60.02
8	-2.219	39.60	-2.294	49.16
9	-2.193	35.86	-2.240	42.46
10	-2.143	28.00	-2.129	25.64
11	-2.104	21.32	-2.008	1.72



ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 100 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1185.00	1187.00	1189.00	1187.00	0.010000	1.3757E-05		
30	1160.56	1162.56	1164.56	1162.56	0.009794	1.3757E-05	79.48	2.06
60	1160.19	1162.19	1164.19	1162.19	0.009791	1.3757E-05	39.67	2.09
90	1133.83	1135.83	1137.83	1135.83	0.009569	1.3757E-05	53.62	4.31
120	1128.00	1130.00	1132.00	1130.00	0.009520	1.3757E-05	44.02	4.80
150	1127.45	1129.45	1131.45	1129.45	0.009515	1.3757E-05	34.93	4.85
180	1121.89	1123.89	1125.89	1123.89	0.009468	1.3757E-05	31.35	5.32
210	1119.54	1121.54	1123.54	1121.54	0.009449	1.3757E-05	27.37	5.51
240	1112.05	1114.05	1116.05	1114.05	0.009385	1.3757E-05	26.19	6.15
270	1110.00	1112.00	1114.00	1112.00	0.009368	1.3757E-05	23.49	6.32
300	1108.00	1110.00	1112.00	1110.00	0.009351	1.3757E-05	21.28	6.49
330	1106.35	1108.35	1110.35	1108.35	0.009337	1.3757E-05	19.38	6.63
360	1105.51	1107.51	1109.51	1107.51	0.009330	1.3757E-05	17.59	6.70

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 150 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1169.09	1167.00	1172.25	1169.45	0.009852	1.818E-05	38.05	1.48
60	1159.88	1158.86	1150.78	1156.51	0.009743	3.429E-05	32.50	2.57
90	1160.18	1142.31	1137.73	1146.74	0.009661	8.160E-05	28.12	3.39
120	1144.30	1118.24	1128.17	1131.61	0.009533	9.047E-05	28.52	4.67
150	1143.91	1110.86	1140.05	1130.24	0.009522	1.243E-04	22.97	4.78
180	1122.97	1117.67	1117.75	1120.27	0.009438	2.089E-05	22.10	5.62
210	1120.31	1112.24	1128.27	1119.46	0.009431	5.513E-05	18.82	5.69
240	1117.19	1115.48	1117.00	1116.56	0.009407	6.447E-06	16.86	5.93
270	1091.93	1100.75	1105.57	1099.42	0.009262	4.758E-05	18.28	7.38
300	1075.83	1099.97	1112.00	1095.93	0.009233	1.267E-04	16.78	7.67
330	1075.73	1095.14	1099.07	1089.98	0.009183	8.596E-05	15.93	8.17
360	1072.16	1074.18	1096.38	1080.91	0.009106	9.244E-05	15.65	8.94

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1165.55	1147.09	1164.88	1159.17	0.009766	7.202E-05	45.24	2.34
60	1154.77	1147.00	1144.99	1148.92	0.009679	3.553E-05	30.44	3.21
90	1130.93	1145.93	1117.99	1131.62	0.009533	9.618E-05	29.02	4.67
120	1140.41	1101.92	1108.33	1116.89	0.009409	1.419E-04	27.08	5.91
150	1109.74	1089.96	1114.41	1104.70	0.009307	8.928E-05	24.98	6.93
180	1103.20	1087.85	1094.21	1095.09	0.009226	5.305E-05	22.83	7.74
210	1100.95	1068.57	1079.87	1083.13	0.009125	1.130E-04	21.71	8.75
240	1078.54	1058.21	1074.04	1070.26	0.009017	7.345E-05	20.96	9.83
270	1063.15	1044.30	1065.08	1057.51	0.008909	7.897E-05	20.27	10.91
300	1041.77	1030.97	1048.79	1040.51	0.008766	6.175E-05	20.25	12.34
330	1016.82	1022.55	1031.50	1023.62	0.008624	5.089E-05	20.12	13.76
360	988.93	1006.84	1014.70	1003.31	0.008453	9.085E-05	20.33	15.47

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1174.90	1161.80	1151.21	1162.64	0.009795	8.163E-05	31.69	2.05
60	1147.13	1132.34	1107.03	1128.83	0.009510	1.395E-04	37.20	4.90
90	-	1106.59	1065.66	1086.13	0.009150	4.316E-03	42.28	8.50
120	1065.44	1059.57	1027.73	1050.91	0.008854	1.396E-04	42.04	11.46
150	1074.07	1070.19	998.12	1047.46	0.008824	2.942E-04	33.88	11.76
180	-	1054.48	976.19	1015.34	0.008554	4.041E-03	34.11	14.46
210	1008.12	1053.41	960.08	1007.20	0.008485	3.210E-04	30.07	15.15
240	959.21	1003.77	939.56	967.51	0.008151	2.263E-04	31.52	18.49
270	957.35	1002.22	914.34	957.97	0.008071	3.023E-04	28.69	19.29
300	915.22	1001.47	870.37	929.02	0.007827	4.583E-04	28.52	21.73
330	879.91	960.75	857.17	899.28	0.007576	3.745E-04	28.35	24.24
360	812.18	937.83	837.00	862.34	0.007265	4.578E-04	28.74	27.35

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1184.35	1187.00	1189.65	1187.00	0.010000	1.823E-05		
30	1087.94	1090.59	1093.24	1090.59	0.009188	1.823E-05	62.70	8.12
60	1004.59	1007.24	1009.89	1007.24	0.008486	1.823E-05	57.48	15.14
90	842.15	844.80	847.45	844.80	0.007117	1.823E-05	71.71	28.83
120	743.31	745.96	748.61	745.96	0.006284	1.823E-05	68.13	37.16
150	652.41	655.06	657.71	655.06	0.005519	1.823E-05	64.58	44.81
180	522.12	524.77	527.42	524.77	0.004421	1.823E-05	65.80	55.79
210	442.65	445.30	447.95	445.30	0.003751	1.823E-05	62.02	62.49
240	330.89	333.54	336.19	333.54	0.002810	1.823E-05	61.29	71.90
270	221.24	223.89	226.54	223.89	0.001886	1.823E-05	60.32	81.14
300	171.66	174.31	176.96	174.31	0.001468	1.823E-05	55.98	85.32
330	81.35	84.00	86.65	84.00	0.000708	1.823E-05	54.35	92.92
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	52.54	100.00

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1000 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1183.57	1187.00	1191.33	1187.00	0.010000	2.676E-05		
30	1079.62	1083.05	1087.38	1083.05	0.009124	2.676E-05	33.80	8.76
60	924.37	927.80	932.13	927.80	0.007816	2.676E-05	41.44	21.84
90	781.80	785.23	789.56	785.23	0.006615	2.676E-05	42.10	33.85
120	654.51	657.94	662.27	657.94	0.005543	2.676E-05	40.86	44.57
150	481.26	484.69	489.02	484.69	0.004083	2.676E-05	42.63	59.17
180	394.38	397.81	402.14	397.81	0.003351	2.676E-05	39.21	66.49
210	328.93	332.36	336.69	332.36	0.002800	2.676E-05	35.73	72.00
240	197.73	201.16	205.49	201.16	0.001695	2.676E-05	35.40	83.05
270	91.53	94.96	99.29	94.96	0.000800	2.676E-05	34.20	92.00
300	61.63	65.06	69.39	65.06	0.000548	2.676E-05	31.01	94.52
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	2.676E-05	29.24	100.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	2.676E-05	26.27	100.00

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2000 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1182.67	1187.00	1191.33	1187.00	0.010000	2.979E-05		
30	877.42	881.75	886.08	881.75	0.007428	2.979E-05	49.63	25.72
60	672.16	676.49	680.82	676.49	0.005699	2.979E-05	40.81	43.01
90	475.56	479.89	484.22	479.89	0.004043	2.979E-05	37.05	59.57
120	309.68	314.01	318.34	314.01	0.002645	2.979E-05	33.71	73.55
150	194.03	198.36	202.69	198.36	0.001671	2.979E-05	30.01	83.29
180	63.65	67.98	72.31	67.98	0.000573	2.979E-05	27.80	94.27
210	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	24.81	100.00
240	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	21.31	100.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	18.59	100.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	16.41	100.00
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	14.62	100.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	13.13	100.00

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 4000 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1189.35	1187.00	0.010000	9.333E-06		
30	632.00	636.34	638.69	636.34	0.005361	2.335E-05	44.77	46.39
60	318.50	324.97	327.32	324.97	0.002738	3.142E-05	34.46	72.62
90	123.00	139.12	141.47	139.12	0.001172	6.916E-05	27.45	88.28
120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	22.92	100.00
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	18.01	100.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	14.74	100.00
210	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	12.41	100.00
240	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	10.66	100.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	9.29	100.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	8.20	100.00
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	7.31	100.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	6.57	100.00



ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 100 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1159.49	1161.87	1157.11	1159.49	0.009768	1.637E-05	89.46	2.32
60	1164.65	1148.31	1157.25	1156.74	0.009745	5.627E-05	48.39	2.55
90	1153.40	1149.80	1157.00	1153.40	0.009717	2.476E-05	35.21	2.83
120	1144.87	1150.28	1163.19	1152.78	0.009712	6.474E-05	26.43	2.88
150	1156.40	1129.04	1157.00	1147.48	0.009667	1.099E-04	23.99	3.33
180	1134.10	1133.84	1161.12	1143.02	0.009629	1.078E-04	21.85	3.71
210	1135.76	1129.00	1142.51	1135.76	0.009568	4.647E-05	21.43	4.32
240	1130.41	1117.62	1143.20	1130.41	0.009523	8.798E-05	20.32	4.77
270	1144.83	1117.00	1129.22	1130.35	0.009523	9.595E-05	17.74	4.77
300	1108.87	1124.52	1136.18	1123.19	0.009462	9.426E-05	17.64	5.38
330	1122.95	1124.21	1122.17	1123.11	0.009462	7.081E-06	15.74	5.38
360	1117.00	1117.00	1117.00	1117.00	0.009410	1.098E-10	15.49	5.90

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 150 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1173.97	1167.67	1177.62	1173.09	0.009883	3.462E-05	30.16	1.17
60	1157.00	1156.97	1162.00	1158.66	0.009761	1.992E-05	30.21	2.39
90	1143.07	1148.37	1158.66	1150.03	0.009689	5.453E-05	25.82	3.11
120	1112.61	1137.56	1138.42	1129.53	0.009516	1.008E-04	29.59	4.84
150	1111.84	1132.28	1142.45	1128.86	0.009510	1.072E-04	23.53	4.90
180	1107.00	1118.15	1128.15	1117.77	0.009417	7.278E-05	22.93	5.83
210	1107.09	1098.72	1131.47	1112.43	0.009372	1.170E-04	20.79	6.28
240	1094.68	1105.22	1114.37	1104.76	0.009307	6.778E-05	19.69	6.93
270	1079.52	1109.17	1100.35	1096.35	0.009236	1.047E-04	18.93	7.64
300	1046.68	1090.03	1089.35	1075.35	0.009059	1.708E-04	20.57	9.41
330	1029.44	1090.50	1074.22	1064.72	0.008970	2.175E-04	20.08	10.30
360	1018.89	1082.00	1069.82	1056.90	0.008904	2.303E-04	19.19	10.96

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1176.62	1170.71	1171.50	1172.94	0.009882	2.207E-05	22.86	1.18
60	1156.47	1166.56	1156.46	1159.83	0.009771	4.009E-05	21.72	2.29
90	1127.55	1126.63	1140.65	1131.61	0.009533	5.394E-05	29.02	4.67
120	1113.76	1108.49	1122.68	1114.98	0.009393	4.934E-05	27.81	6.07
150	1098.88	1085.51	1088.98	1091.12	0.009192	4.772E-05	29.10	8.08
180	1080.87	1078.17	1086.07	1081.70	0.009113	2.762E-05	26.16	8.87
210	1065.59	1081.78	1068.42	1071.93	0.009031	5.948E-05	24.06	9.69
240	1046.22	1046.43	1035.78	1042.81	0.008785	4.188E-05	25.89	12.15
270	1017.75	1027.81	1047.93	1031.16	0.008687	1.057E-04	24.40	13.13
300	1004.31	1027.84	1015.03	1015.73	0.008557	8.103E-05	23.67	14.43
330	994.94	1007.28	999.17	1000.46	0.008429	4.313E-05	22.98	15.71
360	978.32	968.31	996.96	981.20	0.008266	1.000E-04	22.77	17.34

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1169.20	1174.16	1175.03	1172.80	0.009880	2.163E-05	18.48	1.20
60	1158.69	1147.35	1147.25	1151.10	0.009698	4.524E-05	22.96	3.02
90	1115.49	1115.91	1123.33	1118.24	0.009421	3.034E-05	28.82	5.79
120	1069.69	1106.82	1092.94	1089.82	0.009181	1.291E-04	30.02	8.19
150	1063.03	1062.10	1082.00	1069.04	0.009006	7.725E-05	28.64	9.94
180	1036.48	1044.64	1063.85	1048.32	0.008832	9.666E-05	27.56	11.68
210	1011.64	1031.68	1028.18	1023.83	0.008625	7.363E-05	27.29	13.75
240	980.78	991.44	1011.92	994.71	0.008380	1.089E-04	27.62	16.20
270	948.08	966.87	981.09	965.35	0.008133	1.139E-04	27.76	18.67
300	905.56	943.33	949.03	932.64	0.007857	1.625E-04	28.12	21.43
330	864.73	922.40	922.17	903.10	0.007608	2.286E-04	27.98	23.92
360	833.39	914.90	905.55	884.61	0.007453	3.068E-04	26.77	25.47

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1084.05	1057.91	1110.19	1084.05	0.009133	1.798E-04	66.96	8.67
60	931.67	917.00	946.33	931.67	0.007849	1.009E-04	81.65	21.51
90	839.04	837.44	840.64	839.04	0.007069	1.101E-05	72.92	29.31
120	723.65	732.03	715.27	723.65	0.006096	5.764E-05	71.57	39.04
150	634.07	641.67	626.46	634.07	0.005342	5.231E-05	67.13	46.58
180	537.11	556.81	517.40	537.11	0.004525	1.355E-04	64.58	54.75
210	446.48	473.63	419.32	446.48	0.003761	1.868E-04	61.92	62.39
240	327.89	377.27	278.51	327.89	0.002762	3.397E-04	61.70	72.38
270	278.53	350.78	206.27	278.53	0.002346	4.970E-04	56.90	76.54
300	147.10	283.62	164.78	198.50	0.001672	5.107E-04	54.65	83.28
330	33.67	115.00	102.22	83.63	0.000705	3.008E-04	54.36	92.95
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	52.54	100.00

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1000 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1047.82	1045.90	1043.98	1045.90	0.008811	1.321E-05	45.88	11.89
60	823.26	821.34	819.42	821.34	0.006919	1.321E-05	58.46	30.81
90	643.03	641.11	639.19	641.11	0.005401	1.321E-05	57.20	45.99
120	491.72	489.80	487.88	489.80	0.004126	1.321E-05	53.85	58.74
150	358.56	356.64	354.72	356.64	0.003005	1.321E-05	50.40	69.95
180	267.16	265.24	263.32	265.24	0.002235	1.321E-05	45.79	77.65
210	163.12	161.20	159.28	161.20	0.001358	1.321E-05	42.89	86.42
240	146.30	144.38	142.46	144.38	0.001216	1.321E-05	37.44	87.84
270	108.55	106.63	104.71	106.63	0.000898	1.321E-05	33.83	91.02
300	80.37	78.45	76.53	78.45	0.000661	1.321E-05	30.64	93.39
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	29.24	100.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	26.27	100.00

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2000 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	889.17	882.85	876.53	882.85	0.007438	4.349E-05	49.45	25.62
60	596.20	589.88	583.56	589.88	0.004970	4.349E-05	47.74	50.30
90	403.23	396.91	390.59	396.91	0.003344	4.349E-05	41.39	66.56
120	229.05	222.73	216.41	222.73	0.001876	4.349E-05	37.24	81.24
150	167.55	161.23	154.91	161.23	0.001358	4.349E-05	31.13	86.42
180	121.85	115.53	109.21	115.53	0.000973	4.349E-05	26.62	90.27
210	97.98	91.66	85.34	91.66	0.000772	4.349E-05	22.90	92.28
240	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	21.31	100.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	18.59	100.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	16.41	100.00
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	14.62	100.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	13.13	100.00

ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 4000 มิลลิแอมแปร์ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	758.75	751.56	744.37	751.56	0.006332	4.946E-05	35.40	36.68
60	324.01	316.82	309.63	316.82	0.002669	4.946E-05	34.78	73.31
90	189.46	182.27	175.08	182.27	0.001536	4.946E-05	26.32	84.64
120	111.74	104.55	97.36	104.55	0.000881	4.946E-05	20.90	91.19
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	18.01	100.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	14.74	100.00
210	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	12.41	100.00
240	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	10.66	100.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	9.29	100.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	8.20	100.00
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	7.31	100.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000	0.000E+00	6.57	100.00



ตารางที่ ก.20 ผลการหาค่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้วแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 10 ซม และพื้นที่ขั้ว 6.5×12 ซม<sup>2</sup>

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1077.22	1090.59	1042.42	1090.59	0.009188	1.711E-04	55.74	8.12
60	979.67	1007.24	951.87	1007.24	0.008486	1.904E-04	51.96	15.14
90	736.10	844.80	851.58	844.80	0.007117	4.458E-04	65.94	28.83
120	732.07	756.51	780.95	756.51	0.006373	1.681E-04	62.22	36.27
150	629.96	668.51	707.05	668.51	0.005632	2.651E-04	59.95	43.68
180	543.77	581.93	620.09	581.93	0.004903	2.625E-04	58.30	50.97
210	482.38	527.84	573.30	527.84	0.004447	3.127E-04	54.44	55.53
240	436.64	428.82	421.00	428.82	0.003613	5.379E-05	54.79	63.87
270	424.77	386.32	347.86	386.32	0.003255	2.645E-04	51.43	67.45
300	318.62	277.89	237.16	277.89	0.002341	2.802E-04	52.56	76.59
330	291.56	252.82	214.07	252.82	0.002130	2.665E-04	49.10	78.70
360	224.74	184.63	144.51	184.63	0.001555	2.759E-04	48.29	84.45

ตารางที่ ก.21 ผลการหาระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 10 ซม และพื้นที่ขั้ว 6.5×12 ซม<sup>2</sup>

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1215.97	1004.51	1052.52	1091.00	0.009191	7.626E-04	55.50	8.09
60	913.80	895.31	932.29	913.80	0.007698	1.272E-04	78.97	23.02
90	844.58	848.82	846.70	846.70	0.007133	1.458E-05	65.58	28.67
120	705.51	769.75	767.63	747.63	0.006298	2.510E-04	63.50	37.02
150	572.51	696.75	694.63	654.63	0.005515	4.892E-04	61.55	44.85
180	423.26	577.50	575.38	525.38	0.004426	6.084E-04	63.75	55.74
210	474.23	514.47	512.35	500.35	0.004215	1.558E-04	56.71	57.85
240	364.89	429.13	427.01	407.01	0.003429	2.510E-04	56.37	65.71
270	285.50	349.74	347.62	327.62	0.002760	2.510E-04	55.20	72.40
300	201.79	296.03	293.91	263.91	0.002223	3.701E-04	53.37	77.77
330	184.32	248.56	246.44	226.44	0.001908	2.510E-04	50.48	80.92
360	167.39	210.63	208.51	195.51	0.001647	1.677E-04	47.77	83.53

ตารางที่ ก.22 ผลการหาค่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้วแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 ซม และพื้นที่ขั้ว 3.25×12 ซม<sup>2</sup>

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1087.31	1089.89	1084.73	1087.31	0.009160	1.775E-05	57.63	8.40
60	990.57	1010.99	970.15	990.57	0.008345	1.405E-04	56.78	16.55
90	873.05	872.14	873.96	873.05	0.007355	6.260E-06	60.50	26.45
120	788.80	781.87	795.72	788.80	0.006645	4.763E-05	57.55	33.55
150	681.65	633.31	729.99	681.65	0.005743	3.325E-04	58.43	42.57
180	606.64	582.02	631.25	606.64	0.005111	1.693E-04	55.92	48.89
210	549.35	513.42	585.27	549.35	0.004628	2.471E-04	52.66	53.72
240	490.56	451.07	530.05	490.56	0.004133	2.716E-04	50.33	58.67
270	375.54	268.22	454.85	375.54	0.003164	6.443E-04	52.12	68.36
300	309.44	240.90	377.98	309.44	0.002607	4.715E-04	50.73	73.93
330	275.31	232.74	317.87	275.31	0.002319	2.928E-04	47.91	76.81
360	224.03	176.78	271.27	224.03	0.001887	3.250E-04	46.39	81.13

ตารางที่ ก.23 ผลการหาระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 ซม และพื้นที่ขั้ว 3.25×12 ซม<sup>2</sup>

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	SD	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000	1.098E-10		
30	1031.38	1026.85	1214.77	1091.00	0.009191	7.375E-04	55.50	8.09
60	930.98	919.71	890.71	913.80	0.007698	1.429E-04	78.97	23.02
90	760.48	802.92	976.70	846.70	0.007133	7.881E-04	65.58	28.67
120	736.99	711.44	854.46	767.63	0.006467	5.247E-04	60.61	35.33
150	630.92	598.69	854.28	694.63	0.005852	9.575E-04	56.93	41.48
180	475.74	481.89	768.51	575.38	0.004847	1.151E-03	58.93	51.53
210	435.90	330.39	770.76	512.35	0.004316	1.582E-03	55.72	56.84
240	346.24	252.45	682.34	427.01	0.003597	1.555E-03	54.92	64.03
270	288.73	167.84	586.29	347.62	0.002929	1.481E-03	53.92	70.71
300	172.39	122.21	587.13	293.91	0.002476	1.755E-03	51.63	75.24
330	120.97	90.04	528.31	246.44	0.002076	1.682E-03	49.43	79.24
360	118.46	83.61	423.46	208.51	0.001757	1.286E-03	47.14	82.43

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองการนำกลับดินบุกด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้น้ำเสียจริง เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 2 (มก/ลิตร)	ครั้งที่ 3 (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (มก/ลิตร)	เฉลี่ย (โมล/ลิตร)	Ø (%)	% recovery
0	1187.00	1187.00	1187.00	1187.00	0.010000		
30	1097.00	1091.87	1102.13	1097.00	0.009242	58.53	7.58
60	986.34	981.21	991.47	986.34	0.008310	65.25	16.90
90	860.22	855.09	865.35	860.22	0.007247	70.84	27.53
120	765.17	760.04	770.30	765.17	0.006446	68.59	35.54
150	704.91	699.78	710.04	704.91	0.005939	62.71	40.61
180	583.97	578.84	589.10	583.97	0.004920	65.37	50.80
210	526.84	521.71	531.97	526.84	0.004438	61.34	55.62
240	403.34	398.21	408.47	403.34	0.003398	63.71	66.02
270	389.94	384.81	395.07	389.94	0.003285	57.60	67.15
300	322.30	317.17	327.43	322.30	0.002715	56.24	72.85
330	226.26	221.13	231.39	226.26	0.001906	56.80	80.94
360	155.97	150.84	161.10	155.97	0.001314	55.88	86.86

ตารางที่ ก.25 ผลเปรียบเทียบการนำกลับคืนในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

เวลา (นาที)	น้ำเสียจริง			น้ำเสียสังเคราะห์		
	mol/lit	Ø (%)	% RECOVERY	mol/lit	Ø (%)	% RECOVERY
0	0.010000			0.010000		
30	0.009242	58.53	7.58	0.009133	66.96	8.67
60	0.008310	65.25	16.90	0.007849	83.03	21.51
90	0.007247	70.84	27.52	0.007069	75.44	29.31
120	0.006446	68.58	35.53	0.006096	75.34	39.04
150	0.005939	62.70	40.61	0.005342	71.92	46.58
180	0.004912	65.36	50.80	0.004525	70.45	54.75
210	0.004438	61.33	55.61	0.003762	68.8	62.39
240	0.003398	63.70	66.02	0.002762	69.84	72.38
270	0.003285	57.59	67.14	0.002346	65.65	76.54
300	0.002715	56.23	72.84	0.001672	64.29	83.28
330	0.001906	56.80	80.93	0.000705	65.24	92.95
360	0.001314	55.88	86.86	0.000000	64.33	100.00

ตารางที่ ก.26 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี แกร์ไฟต์เป็นขั้วแคโทด และเจือจาง 10 เท่า

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)			
	100 มิลลิแอมแปร์				150 มิลลิแอมแปร์				200 มิลลิแอมแปร์				250 มิลลิแอมแปร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96
1	37.14	42.92	40.23	40.10	35.64	42.86	37.23	38.58	36.00	42.83	37.75	38.86	37.86	42.56	39.61	40.01
2	36.84	42.90	38.59	39.44	35.22	42.15	36.98	38.12	35.76	42.60	37.51	38.62	36.98	42.65	39.00	39.54
3	36.30	42.90	38.23	39.14	35.23	42.06	36.97	38.09	35.22	42.00	36.97	38.06	36.84	41.94	38.59	39.12
4	36.28	42.90	38.03	39.07	35.11	42.10	36.13	37.78	34.92	41.32	36.67	37.64	36.18	41.64	37.93	38.58
5	36.06	42.84	37.81	38.90	35.10	42.06	36.11	37.76	34.56	41.66	35.94	37.39	35.58	41.52	37.33	38.14
6	35.94	41.02	37.69	38.22	35.04	42.05	36.11	37.73	34.33	41.66	35.83	37.27	34.23	41.20	36.30	37.24

ตารางที่ ก.26 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี แกร์ไฟต์เป็นขั้วแคโทด และเจือจาง 10 เท่า (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)			
	500 มิลลิแอมแปร์				1000 มิลลิแอมแปร์				2000 มิลลิแอมแปร์				4000 มิลลิแอมแปร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70	42.70
1	18.93	20.79	17.73	19.15	17.41	19.71	16.21	17.78	16.81	17.11	16.51	16.81	16.18	17.48	17.38	17.01
2	18.19	20.05	15.39	17.88	17.39	19.69	16.19	17.76	16.20	17.05	16.09	16.45	14.60	15.90	15.80	15.43
3	17.65	19.51	15.94	17.70	16.10	18.40	14.90	16.47	16.41	17.01	16.01	16.48	-	-	-	-
4	17.14	19.00	15.84	17.33	15.38	17.68	14.18	15.75	-	-	-	-	-	-	-	-
5	17.04	18.90	15.32	17.09	15.12	17.42	13.92	15.49	-	-	-	-	-	-	-	-
6	16.52	18.38	14.18	16.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



ตารางที่ ก.27 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด และเจือจาง 10 เท่า

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)			
	100 มิลลิแอมแปร์				150 มิลลิแอมแปร์				200 มิลลิแอมแปร์				250 มิลลิแอมแปร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	42.96	40.98	41.23	41.72	42.96	40.98	41.23	41.72	42.96	40.98	41.23	41.72	42.96	40.98	41.23	41.72
1	41.88	40.62	37.48	39.99	42.90	40.68	37.44	40.34	41.88	41.04	37.62	40.18	41.34	40.92	37.92	40.06
2	41.88	40.44	36.94	39.75	41.34	40.68	37.02	39.68	41.40	40.56	36.08	39.35	41.34	40.98	37.74	40.02
3	41.63	40.40	36.89	39.64	41.28	40.68	37.44	39.80	41.46	40.20	35.98	39.21	41.22	40.68	36.24	39.38
4	39.26	40.23	36.82	38.77	41.04	40.44	36.68	39.39	41.16	40.00	35.94	39.03	40.50	39.66	36.66	38.94
5	38.52	40.10	36.72	38.45	37.87	40.14	36.22	38.08	40.98	39.56	35.46	38.67	40.05	39.54	35.74	38.44
6	38.25	40.06	36.60	38.30	37.63	39.96	35.86	37.82	39.50	38.20	34.23	37.31	39.02	38.24	34.58	37.28

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.27 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด และเจือจาง 10 เท่า (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)				ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)			
	500 มิลลิแอมแปร์				1000 มิลลิแอมแปร์				2000 มิลลิแอมแปร์				4000 มิลลิแอมแปร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	42.70	43.90	40.40	42.33	42.70	43.90	40.40	42.33	42.70	43.90	40.40	42.33	42.70	43.90	40.40	42.33
1	22.70	23.90	20.40	22.33	21.30	22.50	19.00	20.93	21.21	17.15	16.55	18.30	21.09	19.29	16.79	19.06
2	19.79	20.99	17.49	19.42	20.50	21.70	18.20	20.13	21.00	16.59	15.00	17.53	-	-	-	-
3	19.32	20.52	17.02	18.95	20.30	21.50	18.00	19.93	17.55	16.22	14.33	16.03	-	-	-	-
4	18.63	19.83	16.33	18.26	18.50	19.70	16.20	18.13	-	-	-	-	-	-	-	-
5	18.01	19.21	15.71	17.64	17.96	19.16	15.66	17.59	-	-	-	-	-	-	-	-
6	17.69	18.89	15.39	17.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ก.28 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียจริง เมื่อทำการทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด และเจือจาง 10 เท่า

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)			
	500 มิลลิแอมแปร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	17.65	16.45	19.95	18.02
1	15.39	14.19	17.69	15.76
2	15.18	13.98	17.48	15.55
3	11.88	10.68	14.18	12.25
4	11.65	10.45	13.95	12.02
5	8.02	6.82	10.32	8.39
6	7.23	6.03	9.53	7.60

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการนำกลับดีบุก

การนำกลับดีบุกโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีค่าใช้จ่ายหลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า เป็นต้น แต่ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้ โดยเฉพาะเครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า เครื่องกวนแม่เหล็ก เครื่องแก้ว พีเอชมิเตอร์ และกระดาษกรอง เป็นต้น ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ถ้านำไปใช้ปฏิบัติงานจริง ต้องมีการปรับปรุงขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด ค่าใช้จ่ายจะแตกต่างกันดังนี้

### ข.1.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการทดลองตกตะกอนทางเคมี

คำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ โดย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ราคา 23 บาทต่อกิโลกรัม โซเดียมซัลไฟด์ ราคา 34 บาทต่อกิโลกรัม และ ไฮโดรคลอริก ราคา 5.75 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

#### ข.1.1.1 การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับให้มีพีเอช 3 ใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 11 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 บาท ถ้าน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.01 บาท

#### ข.1.1.2 การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับให้มีพีเอช 11 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 11.2 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 บาท ถ้าน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.03 บาท ใช้โซเดียมซัลไฟด์ 0.02 โมลต่อลิตร เท่ากับ 1.56 กรัม ค่าโซเดียมซัลไฟด์ 0.05 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ปรับให้มีพีเอช 2 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 13 มิลลิลิตร ค่ากรดไฮโดรคลอริก 0.09 บาท ถ้าน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่ากรดไฮโดรคลอริก 1.77 บาท ดังนั้นน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร เสียค่าสารเคมีทั้งสิ้น 2.85 บาท

### ข.1.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดลองทางไฟฟ้าเคมี

คำนวณจากราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้สูตรคำนวณ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า} &= I \text{ (A)} \times V \text{ (volt)} \times \text{time (hr)} / (V/1000) \\ &= (500/1000) \text{ ampere} \times 2.2 \text{ volt} \times 6 / ((1.8/1000) \times 1000) \\ &= 3.67 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากการใช้พลังงานในการบำบัด คูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย ในที่นี้จะคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวงประเภทที่ 6 สถานที่ราชการไม่หวังผลกำไร ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{ค่าหน่วย/หน่วย}) + (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{FT}) + \text{vat 7\%} \\ &= (3.67 \times 2.5) + (3.67 \times 0.2612) + \text{vat 7\%} \\ &= 10.84 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีค่าใช้จ่าย 10.84 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

### ข.2 วิธีคำนวณผลการทดลอง

#### ข.2.1 ร้อยละการนำกลับ

$$\% \text{ Recovery} = \frac{W_i - W_t}{W_i} \times 100\%$$

$W_i$  = ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

$W_t$  = ค่าความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)

#### ข.2.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส

$$\text{Current efficiency (t)\%} = \frac{nF(C_0 - C_t)V}{\int_0^t I(t)dt} \times 100 \%$$

$n$  = ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อ โมล

$F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์/eq)

$C_0$	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
$C_t$	=	ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)
$V$	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
$I_{(t)}$	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

### ข.2.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ในที่นี้ จะนำค่าความเข้มข้นของดีบุกในน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลา 30 และ 90 นาที มาเป็นตัวอย่างในการคำนวณค่าร้อยละการนำกลับ และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ ขั้วแกรไฟต์ ระยะห่าง 5 เซนติเมตรและพื้นที่ขั้ว  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ในน้ำเสียสังเคราะห์ 0.01 โมล/ลิตร

เวลา 30 นาที ค่าความเข้มข้นของดีบุกในน้ำเสียสังเคราะห์ 0.009188 โมล/ลิตร

เวลา 90 นาที ค่าความเข้มข้นของดีบุกในน้ำเสียสังเคราะห์ 0.007117 โมล/ลิตร

$$\% \text{ Recovery} = \frac{W_i - W_t}{W_i} \times 100\%$$

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{0.01 - 0.009188}{0.01} \times 100\%$$

$$= 8.12\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ร้อยละการนำกลับดีบุก คือ 8.12

แทนค่า ที่เวลา 90 นาที

$$= \frac{0.01 - 0.007117}{0.01} \times 100\%$$

$$= 28.83\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 90 นาที ร้อยละการนำกลับดีบุก คือ 28.83

$$\text{Current efficiency (t)\%} = \frac{nF(C_0 - C_t)V}{\int_0^t I(t)dt} \times 100\%$$

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{4 \times 96500 \times (0.01 - 0.009188) \times 1.8}{0.5 \times 30 \times 60} \times 100\%$$

$$= 62.68\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 62.68%

แทนค่า ที่เวลา 90 นาที

$$= \frac{4 \times 96500 \times (0.01 - 0.007117) \times 1.8}{0.5 \times 90 \times 60} \times 100\%$$

$$= 74.19\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 90 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 74.19 %

ในการพิจารณาเลือกค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ต้องพิจารณาทั้งค่าร้อยละการนำกลับของดีบุก และ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสควบคู่กัน ไป นั่นคือ จากการทดลองมีค่ากระแสไฟฟ้า 8 ค่า คือ 100-4000 มิลลิแอมแปร์ แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ค่าร้อยละการนำกลับสูง มีเพียง 4 ค่า นั่นคือ 500-4000 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งสามารถนำกลับได้ 100% จากนั้น พิจารณากราฟประสิทธิภาพเชิงกระแสกับเวลา และเลือกค่ากระแสที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุด

#### ข.2.4 ค่าการนำกลับตามกฎของฟาราเดย์

$$m = \frac{MIt}{nF}$$

m = มวลที่ควรเกิดปฏิกิริยาในเชิงทฤษฎี

I = กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ผ่านเข้าสู่ระบบ หน่วย แอมแปร์

t = เวลาในการเกิดปฏิกิริยา หน่วย วินาที

M = มวลโมเลกุลของดีบุก หน่วย กรัม

n = อิเล็กตรอนต่อดีบุก 1 โมล ที่เข้าทำปฏิกิริยา

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 96500 คูลอมบ์ หรือ 96500 แอมแปร์.วินาที

แทนค่า

$$m = (118.7g \times 0.500A \times 1hr \times 3600) / (4 \times 96500)$$

$$= 0.56 g$$



ค่าทางทฤษฎีตามกฎของฟาราเดย์ คือ เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ เก็บตัวอย่าง ณ ชั่วโมงที่ 1 เกิดการนำกลับได้ 0.56 กรัม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว อภิรดี สุนทรภา เกิดเมื่อวันที่ 4 เดือนมิถุนายน พ.ศ.2526 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย