

การกำจัดสิ่งก่สึจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน  
โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี



นายสหรัฐ เซาว์รูปดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

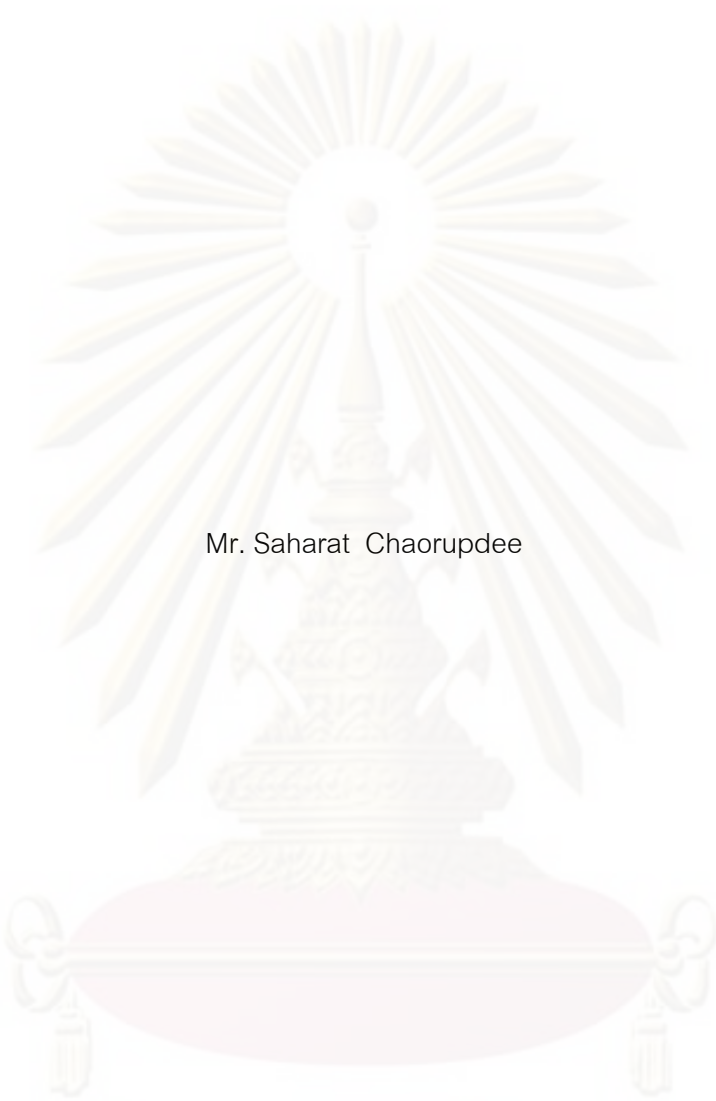
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ZINC REMOVAL FROM RAYON FIBER PRODUCTION FACTORY WASTEWATER USING  
CHEMICAL PRECIPITATION AND ELECTROCHEMICAL PROCESSES



Mr. Saharat Chaorupdee

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดสิ่งก่เสีจากน้ำเสีโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้น  
ใยเรยอน โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และ  
กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

โดย

นายสหรัฐ เชาว์รูปดี

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชมรัฐ โอสถาพันธุ์


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

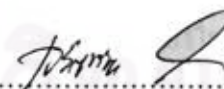
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนริยวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัช ศรีดิษฐ์)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชมรัฐ โอสถาพันธุ์)

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

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์กร ราชกรกิจ)

 ..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีมา ศรีลัมภ์)

สหรัฐ เชาว์รูปดี : การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี. (ZINC REMOVAL FROM RAYON FIBER PRODUCTION FACTORY WASTEWATER USING CHEMICAL PRECIPITATION AND ELECTROCHEMICAL PROCESSES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. เหมรัฐ โอสถาพันธุ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. เจริญขวัญ ไกรยา, 124 หน้า

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การประยุกต์ใช้การตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย เพื่อกำจัดสังกะสี งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว จำนวน 1 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $9 \times 10$  ตารางเซนติเมตร ชุดที่ 2 เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $3 \times 10$  ตารางเซนติเมตร โดยแต่ละชุดการทดลองจะทำการแปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ ส่วนที่สอง ใช้ค่าสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนแรกมาใช้กับน้ำเสียจริง

ผลการทดลองส่วนที่ 1 การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอช 10 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.68% การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ที่พีเอช 9 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.71% ส่วนวิธีทางไฟฟ้าเคมี พบว่า การจัดเรียงขั้วแบบเซลล์ต่อขนาน ที่กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ จัดเป็นสภาวะที่เหมาะสม โดยกำจัดสังกะสี ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ 100%

ผลการทดลองส่วนที่ 2 การทดลองในน้ำเสียจริงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 3.0 มิลลิโมลต่อลิตร โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอช 10 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.40% การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ที่พีเอช 9 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.40% ส่วนวิธีทางไฟฟ้าเคมี พบว่า การจัดเรียงขั้วแบบเซลล์ต่อขนาน ที่กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ กำจัดสังกะสี ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ 24%

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต.....อนุวัฏ โอสถาพันธุ.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....[ลายมือ].....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....[ลายมือ].....



## 51704-1421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

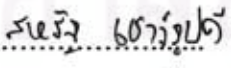

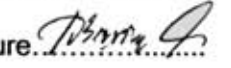
KEY WORD : ZINC / HYDROXIDE PRECIPITATION / SULFIDE PRECIPITATION /  
ELECTROCHEMICAL PROCESSES / INDUSTRIAL WASTEWATER

SAHARAT CHAORUPDEE : ZINC REMOVAL FROM RAYON FIBER  
PRODUCTION FACTORY WASTEWATER USING CHEMICAL PRECIPITATION  
AND ELECTROCHEMICAL PROCESSES. THESIS ADVISOR :  
ASST.PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS COADVISOR :  
CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 124 pp.

The purpose of this study is to apply chemical precipitation and electrochemical methods for zinc removal from synthetic wastewater and rayon fiber production factory wastewater. This work was divided into two sections. The first section included zinc removal from synthetic wastewater by using chemical precipitation; sodium hydroxide and sodium sulfide, and electrochemical processes. Two electrode arrangements : a pair of  $9 \times 10 \text{ cm}^2$  electrode (named single cell) and 3 pairs of  $3 \times 10 \text{ cm}^2$  electrodes (named monopolar multiple electrode with cell in parallel), were compared at four different current levels; 250, 500, 1,000 and 2,000 mA. In the second section, optimum conditions obtained from the first section were applied for the industrial wastewater.

Results from the first section, where initially 24-mM Zn was included in the synthetic wastewater, the optimized pHs of 10 and 9 resulted in 99.68% and 99.71% zinc removal by chemical precipitation with sodium hydroxide and sodium sulfide, respectively. A 100% zinc elimination was achieved in 6 hours duration using electrochemical process with 3-pair electrode arrangement at 500 mA applied current.

In the second section where the industrial wastewater containing 3 mM zinc were investigated, 99.4% zinc was precipitated by either sodium hydroxide or sodium sulfide and 24% of zinc was removed in 6 hours under the electrochemical optimized condition.

Department	Environmental Engineering	Student's signature..... 
Field of study	Environmental Engineering	Advisor's signature..... 
Academic year	2009	Co- advisor's signature..... 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ และ อาจารย์ ดร.จีมา ศรลัมภ์ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และงบประมาณจากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 สังกะสี.....	5
2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย.....	6
2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย.....	6
2.2.2 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย.....	8
2.2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย.....	9
2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	10
2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE).....	10
2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction).....	10
2.3.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis).....	11
2.3.4 การระเหย (Evaporation).....	11
2.3.5 อิลคโตรไดอะไลซิส (Electro dialysis).....	11
2.3.6 การดูดติดผิว (Adsorption).....	11
2.3.7 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation).....	12
2.3.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery).....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี.....	16
2.4.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	18
2.4.2 โพลาริเซชัน.....	20
2.5 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี.....	21
2.5.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell).....	21
2.5.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel).....	22
2.5.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series).....	22
2.5.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode).....	23
2.6 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	23
2.6.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode).....	23
2.6.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode).....	24
2.7 ขั้วไฟฟ้า.....	25
2.7.1 แพลทินัม (Platinum).....	25
2.7.2 ไททาเนียม.....	26
2.7.3 อะลูมิเนียม.....	26
2.7.4 เหล็ก.....	26
2.7.5 แกรไฟต์.....	27
2.8 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	27
2.8.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ( $E^\circ$ ).....	27
2.8.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ ( $E_R$ ).....	28
2.8.3 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน ( $E_p, \eta$ ).....	28
2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า.....	29
2.9.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน.....	29
2.9.2 ความนำไฟฟ้า.....	30
2.9.3 กำลังไฟฟ้า.....	31



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า.....	31
2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency).....	32
2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	33
2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>37</b>
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี.....	37
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	37
3.1.2 สารเคมี.....	38
3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง.....	38
3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	39
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1.....	42
3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2.....	47
3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์.....	51
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....</b>	<b>52</b>
4.1 การทดลองส่วนที่ 1.....	52
4.1.1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	52
4.1.2 การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	53
4.1.3 การกำจัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี.....	54
4.2 การทดลองส่วนที่ 2.....	64
4.2.1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	64
4.2.2 การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	66
4.2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสังกะสี ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์.....	67
4.2.4 การกำจัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี.....	69

**สารบัญ (ต่อ)**

	หน้า
4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	74
4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี.....	74
4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเคมี.....	74
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>76</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรม.....	78
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>79</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>82</b>
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	83
ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ.....	119
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>124</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การใช้วัตถุติดและการเกิดมลพิษจากโรงงาน..... 8
2.2	ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตเส้นใย..... 9
2.3	ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ..... 15
2.4	เปรียบเทียบการตกตะกอนแบบต่างๆ..... 16
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อ การตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์..... 42
3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อ การตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำเสียสังเคราะห์..... 44
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อใช้การจลน์ไฟฟ้า แบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่..... 45
3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อใช้การจลน์ไฟฟ้า แบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่..... 46
3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพของ การตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียจริง.....48
3.6	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพของ การตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำเสียจริง..... 49
3.7	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพ ในการกำจัดสังกะสีโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริง..... 50
3.8	วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด..... 51
4.1	สมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง..... 64
4.2	สมบัติของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง..... 71
4.3	การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการตกตะกอนทางเคมี และการทดลองทางไฟฟ้าเคมี..... 75
ก.1	ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.... 84
ก.2	ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์..... 85

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.3 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์.....	86
ก.4 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์.....	87
ก.5 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์.....	88
ก.6 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	89
ก.7 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์.....	90
ก.8 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์.....	91
ก.9 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์.....	92
ก.10 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	93
ก.11 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์.....	94
ก.12 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์.....	95



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ก.13	ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์.....	96
ก.14	ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	97
ก.15	ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์.....	98
ก.16	ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์.....	99
ก.17	ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์.....	100
ก.18	ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	101
ก.19	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์.....	102
ก.20	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์.....	103
ก.21	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์.....	104
ก.22	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	105
ก.23	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ โมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์.....	106

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.24	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ โมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์..... 107
ก.25	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ โมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์..... 108
ก.26	ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ โมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์..... 109
ก.27	ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 110
ก.28	ผลเปรียบเทียบการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 111
ก.29	ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมซัลไฟด์..... 112
ก.30	ผลเปรียบเทียบการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์..... 113
ก.31	ผลเปรียบเทียบการการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ ในน้ำเสียจริง..... 114
ก.32	ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์..... 115
ก.33	ความนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์..... 116
ก.34	ค่าพีเอชที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์..... 117
ก.35	ผลเปรียบเทียบการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี..... 118

## สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตเส้นใย.....	7
2.2	องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี.....	17
2.3	กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า.....	18
2.4	การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก.....	19
2.5	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว.....	21
2.6	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน.....	22
2.7	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	22
2.8	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์.....	23
2.9	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	24
2.10	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	25
3.1	ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่.....	39
3.3	การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่.....	39
3.4	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่.....	40
3.5	การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่.....	40
3.6	ผังการทำวิจัย.....	41
3.7	วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.8	วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	44
3.9	วิธีการทดลองการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมของ รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่.....	46
3.10	วิธีการทดลองการหาค่าพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมของ รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่.....	47
3.11	วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	48
3.12	วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	49
3.13	วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	50
4.1	ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	52
4.2	ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	53
4.3	ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว.....	55
4.4	ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน.....	56
4.5	ค่าร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว.....	56
4.6	ร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน.....	57
4.7	ความนำไฟฟ้าเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว.....	57
4.8	ความนำไฟฟ้าเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน.....	58
4.9	พีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว.....	61
4.10	พีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน.....	61
4.11	ประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ โมโนโพลาร์ต่อขนาน.....	63
4.12	ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	65



## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	เปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ และค่าทางทฤษฎีกับน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	66
4.14	ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	66
4.15	เปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ และค่าทางทฤษฎีกับน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....	67
4.16	เปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริง ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์.....	68
4.17	เปรียบเทียบความเข้มข้นของสังกะสีกับเวลา เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง.....	69
4.18	เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสังกะสีกับเวลา เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง.....	70
4.19	เปรียบเทียบผลของกระแสต่อความเข้มข้นของสังกะสี เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	70
4.20	ผลของกระแสต่อความเข้มข้นของซีโอดีเมื่อใช้ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	72
4.21	เปรียบเทียบผลของสารแขวนลอยต่อความเข้มข้นของสังกะสี เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 2,000 มิลลิแอมแปร์.....	73

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แร่โลหะหนักจัดเป็นทรัพยากรที่มีอยู่หรือเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยมีบทบาทและความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรมและพลังงาน ซึ่งแร่โลหะหนักโดยส่วนใหญ่แล้วมีอยู่ตามผิวดิน และใช้เวลานานในการเกิดขึ้น ปริมาณของแร่โลหะหนักจึงค่อยๆ ลดน้อยถอยลง เนื่องจากการนำไปใช้ประโยชน์จากความต้องการของมนุษย์ในปริมาณที่สูงและต่อเนื่อง ทั้งนี้ยังอาจส่งผลกระทบต่อธรรมชาติจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย ดังนั้นจึงควรมีมาตรการในการอนุรักษ์และป้องกันแร่โลหะหนักคือ การใช้แร่โลหะอย่างประหยัด การนำแร่โลหะที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีก และการเลือกวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอย่างถูกวิธี เป็นต้น

ปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมภายในประเทศเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยมีอุตสาหกรรมบางชนิดใช้แร่โลหะหนักเป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิต เช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ โรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้า และโรงงานผลิตเส้นใย เป็นต้น ซึ่งโรงงานเหล่านี้มีการใช้ปริมาณของแร่โลหะหนักในปริมาณที่สูงและได้ปล่อยน้ำเสียจำนวนมากที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จึงส่งผลให้แหล่งน้ำธรรมชาติมีคุณภาพที่เสื่อมโทรมมากขึ้น

การตระหนักถึงการลดปริมาณการใช้ทรัพยากรแร่โลหะหนัก และวิธีที่เลือกใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง กระบวนการที่สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การกำจัดโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การใช้วิธีออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction) การใช้วิธีรีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis) การระเหย (Evaporation) การใช้วิธีอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electro dialysis) และการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นต้น การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีนั้นจัดเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และรวดเร็ว ส่วนวิธีทางไฟฟ้าเคมี จัดเป็นวิธีที่ใช้กันมากเนื่องจากไม่ใช้สารเคมีมาช่วยในการกำจัดและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง (Scott และ

คณะ, 1997) อีกทั้งโลหะหนักที่ได้กลับคืนมาจะอยู่ในรูปที่บริสุทธิ์สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ในกระบวนการผลิต

แร่โลหะที่สนใจในงานวิจัยนี้คือสังกะสี เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม ใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใย และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น สังกะสีสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อคุณภาพของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ คือ ที่ความเข้มข้นของสังกะสีเพียง 2 ppm ในน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในเลือดของปลา และยังมีผลอันตรายต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระบบทางเดินหายใจอุดตัน ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์มาก ๆ จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้ จึงเป็นสิ่งที่สมควรอย่างยิ่งที่จะศึกษาถึงวิธีการในการบำบัดสังกะสีที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียของกระบวนการผลิตเพื่อลดการปนเปื้อนของสังกะสีในน้ำเสียให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะสามารถปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ หรือการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายสำหรับการประกอบการของอุตสาหกรรมในด้านนี้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ถึงวิธีการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยเลือกใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในวิธีของการตกตะกอนทางเคมีจะเลือกใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และนำมาทดสอบกับน้ำเสียจริงของโรงงานผลิตเส้นใย สำหรับการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะทำการศึกษาค่าตัวแปรของกระแสไฟฟ้า และรูปแบบในการจัดวางขั้วไฟฟ้า เพื่อเลือกใช้ตัวแปรและรูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และนำมาทดสอบกับน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เพื่อศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม ในกระบวนการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์

2. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อศึกษาค่ากระแสไฟฟ้า และรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม
3. ศึกษาประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากการกำจัดสังกะสี โดยวิธีการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใย โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการทดสอบ
4. ศึกษาประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากการกำจัดสังกะสี ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใย โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการทดสอบ
5. หาปริมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใย

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่
  - 1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีสังกะสีที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
  - 1.2 น้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย
2. งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนการทดลองหลัก ได้แก่

#### การทดลองส่วนที่ 1

1. ศึกษาความสามารถในการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 4 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนถึงจุดพีเอชที่ 12 เพื่อให้ได้ค่าพีเอชที่เหมาะสม
2. ศึกษาความสามารถในการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติม



โซเดียมซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร แล้วแปรเปลี่ยนค่าพีเอชโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก จนสิ้นสุดพีเอชที่ 4 เพื่อให้ได้ค่าพีเอชที่เหมาะสม

- ศึกษาความสามารถในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด และแต่ละชุดการทดลองมีขั้วแอโนดและแคโทดเป็นแกรไฟต์ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 เซนติเมตร ซึ่งแต่ละชุดการทดลองจะมีลำดับการทดลองเช่นเดียวกัน คือ ชุดที่ 1 เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $9 \times 10$  ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 ขั้ว ชุดที่ 2 เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $3 \times 10$  ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 ขั้ว โดยแต่ละชุดการทดลองจะทำการแปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์

#### การทดลองส่วนที่ 2

- ศึกษาประสิทธิภาพในการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียจริง ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ มาทำการทดสอบ
- ศึกษาประสิทธิภาพในการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียจริง ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้ค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ มาทำการทดสอบ
- ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริง โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า และรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ มาทำการทดสอบ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสังกะสีของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี
- เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงของโรงงานผลิตเส้นใย โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี หรือวิธีทางไฟฟ้าเคมี
- เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการ การพัฒนา และปรับปรุง วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย
- เป็นแนวทางการลดมลภาวะทางน้ำที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้
- ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1 สังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุในกลุ่ม 2 ของตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ธาตุ คือ Zn มีเลขอะตอมเท่ากับ 30 และมีอยู่หลายไอโซโทปในธรรมชาติ ได้แก่  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{67}\text{Zn}$ ,  $^{68}\text{Zn}$  และ  $^{70}\text{Zn}$

สังกะสีบริสุทธิ์จะมีความอ่อน ซึ่งสามารถฉนวนเป็นแผ่นหรือใช้ทำเป็นแผ่นพรอยได้ ค่า Oxidation state มีค่าเท่ากับ +2 เมื่ออยู่ในรูปสารประกอบ และจะคงสภาพไม่เปลี่ยนแปลงอยู่ได้จนถึงอุณหภูมิ 225 C° ในสภาวะอากาศแห้ง แต่ในสภาวะที่มีความชื้นและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่จะเกิดการออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเผาในบรรยากาศจะเกิดเป็นออกไซด์ขึ้น คือ ZnO ในบรรยากาศที่เย็นสังกะสีจะไม่ทำปฏิกิริยากับ คลอรีน โบรมีน และฟลูออรีน แต่ในบรรยากาศที่มีความชื้นอาจจะเกิดการเหนียวทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ได้ ผงสังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์เกิดเป็น Zinc sulfide (ZnS) แต่หากทำปฏิกิริยากับอะซิไนด์จะได้ Zinc carbide ( $\text{ZnC}_2$ ) สังกะสีเป็น Reducing agent ที่แรงสามารถที่จะรีดิวซ์เกลือของแมงกานีส เหล็ก นิเกิล ทองแดง และแคดเมียม เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกจะรีดิวซ์  $\text{NO}_3^-$  ion ให้กลายเป็น  $\text{NH}_4^+$  และจะทำปฏิกิริยากับกรดอื่นๆเกิดเป็นเกลือขึ้น สังกะสีจะละลายในอัลคาไลน์และแอมโมเนีย ซึ่งเกลือของสังกะสีส่วนใหญ่จะละลายน้ำ

ดังนั้นสังกะสีจึงถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น ถึงแม้ว่าสังกะสีจะเป็นตัวที่นิยมถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต แต่ก็สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมได้ถ้าหากเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งสังกะสีเพียง 2 ppm ในน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในเลือดของปลา ส่วนอันตรายที่เกิดต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระบบทางเดินหายใจอุดตัน ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์มาก ๆ จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้ ในส่วนของความเป็นพิษต่อ

แบคทีเรียที่มีอยู่ในระบบบำบัดทางชีวภาพจะถูกยับยั้งหรือชลล เมื่อมีความเข้มข้นของสังกะสี 10 mg/l ขึ้นไป

## 2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

### 2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย

กระบวนการผลิตพอลิเอสเตอร์ของอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการผลิต ดังนี้

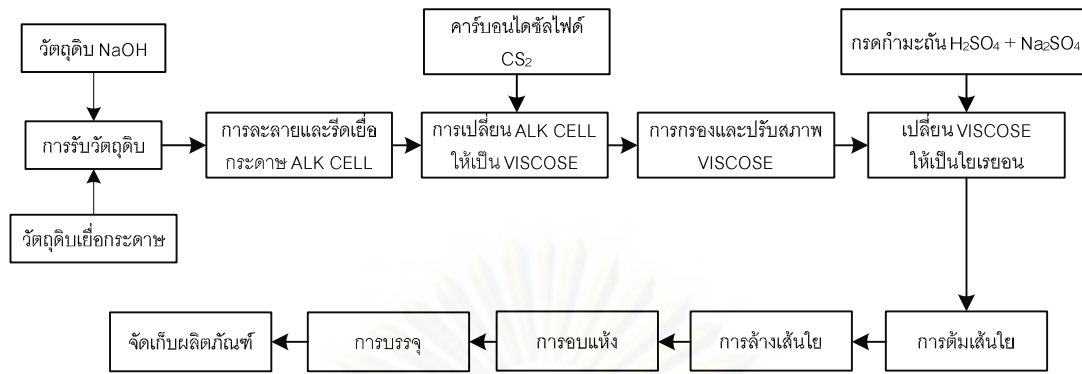
1. กระบวนการผลิตเส้นใย จัดว่าเป็นกระบวนการผลิตหลัก โดยการนำเยื่อเซลลูโลสซึ่งอยู่ในรูปแผ่นกระดาษมาผสมกับด่างโซดาไฟในถังกวน เพื่อทำเป็นเยื่อต่าง (Alkali cellulose) แล้วส่งไปยังเครื่องรีดโซดาไฟส่วนเกินออก เพื่อให้ได้เยื่อต่างที่มีอัตราส่วนของด่างโซดาไฟที่เหมาะสม เยื่อต่างจะถูกส่งต่อไปยังถังหมักเพื่อทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสสั้นลงได้ตามที่ต้องการ

จากนั้นเยื่อต่างจะถูกส่งไปทำปฏิกิริยากับสารคาร์บอนไดซัลไฟด์ ( $CS_2$ ) ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนจากเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสแซนเทต (Cellulose xanthate) และจะถูกนำไปทำละลายต่อด้วยสารละลายด่างโซดาไฟ เกิดเป็นสารละลายที่เรียกว่า "วิสโคส" (Viscose)

สารละลายวิสโคสนี้จะถูกนำไปกรองเพื่อนำส่วนที่ไม่ละลายออก พร้อมกับผ่านกระบวนการดูดฟองอากาศ จากนั้นสารละลายวิสโคสจะถูกบีบไปยังบ่อในสารละลายผสมที่ประกอบไปด้วย กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ) และสังกะสีซัลเฟต ( $ZnSO_4$ )

สารละลายวิสโคสและสารละลายผสมจะถูกฉีดเป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก เส้นใยที่ได้นี้จะถูกนำไปตัดแล้วต้มให้ร้อนเพื่อให้เส้นใยเกิดการเปิดตัวได้ดี จากนั้นจะนำเส้นใยไปล้างสารเคมีก่อนที่จะเข้าสู่การอบแห้งเพื่ออัดเป็นก้อน และส่งจำหน่ายต่อไป ดังรูปที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ผังกระบวนการผลิตเส้นใย

2. กระบวนการผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ ( $CS_2$ ) เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการนำถ่านมาเผาเพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยออก หลังจากนั้นนำมาเติมลงในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ ถ่านที่อยู่ในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยการอาร์คของขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว จากนั้นกำมะถันเหลวจะถูกฉีดเข้าไปในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ กำมะถันจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในถ่าน เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งเข้าไปในถัง Sulfur separator เพื่อแยกเอาละอองไอกำมะถันออกจากก๊าซ ส่วนที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะถูกส่งผ่านเข้าระบบควบแน่น ก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกควบแน่นเป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์เหลว และจะถูกนำไปเก็บในถังเก็บ Crude  $CS_2$  ในส่วนนี้จะถูกนำมากลั่นให้เป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่บริสุทธิ์ จากนั้นถึงจะส่งไปใช้ในกระบวนการผลิต

3. กระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการป้อนกำมะถันเหลวเข้าสู่เตาเผากำมะถันโดยใช้ลมจาก Blower ในการเผาไหม้ให้เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ที่อุณหภูมิ 950 ถึง 970 องศาเซลเซียส ก๊าซร้อนที่ได้จะถูกลดอุณหภูมิโดยส่งผ่านหม้อน้ำ ก๊าซที่ลดอุณหภูมิแล้วจะถูกส่งเข้าไปในถัง Converter เพื่อให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $SO_3$ ) โดยมีสารเร่งปฏิกิริยา ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ออกจาก Converter จะถูกลดอุณหภูมิก่อนจะส่งเข้าหอจับก๊าซ (Absorption tower) เพื่อจับก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ให้เปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริก ก๊าซที่เหลือจากหอจับก๊าซจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยน้ำ (Water scrubber) เพื่อบำบัดก๊าซ หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยสารละลายด่าง (Caustic scrubber) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ไอน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตสามารถนำไปหลอมละลายกำมะถัน ส่วนลมร้อนและน้ำร้อนสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้



## 2.2.2 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย

การใช้วัตถุดิบของอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย สามารถสรุปการใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน

รายการ	ปริมาณ (ตันต่อเดือน)	ปริมาณ (ตันต่อ 1 ตันผลิตภัณฑ์)
<b>ผลิตภัณฑ์</b>		
เส้นใยเรยอน	11,250	1
เกลือโซเดียมซัลเฟต	8,670	0.77
<b>วัตถุดิบ</b>		
เยื่อกระดาษ	11,600	1.031
โซดาไฟ	6,360	0.565
สารคาร์บอนไดซัลไฟด์	1,800	0.160
กรดซัลฟิวริก	8,720	0.775
สังกะสี	35	0.003
น้ำ Soft Water	675,250	60
น้ำ Hard Water	247,600	22
<b>ของเสีย</b>		
น้ำเสีย	1,181,700	105
อากาศเสีย	7.3 ล้าน ลบ.ม.	650 (ลบ.ม./ตัน)
กากตะกอน Bio Sludge	410	0.037
กากตะกอน Zinc Sludge	900	0.080
กากของเสียอื่นๆ	72	0.006

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

### 2.2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย

กระบวนการผลิตเส้นใยตามที่ได้กล่าวมานั้นจะทำให้เกิดน้ำเสีย 2 ประเภท คือ น้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดและมีโลหะหนักสังกะสี กับน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกลางหรือต่างแต่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสีปนเปื้อน

1. น้ำเสียประเภทแรก มีจุดกำเนิดที่ขั้นตอนกระบวนการล้างเส้นใย ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการเกิดเส้นใย การตัดเส้นใยเป็นท่อนๆ แล้วต้มเส้นใยให้ร้อนจนเปิดตัวได้ดี น้ำที่ผ่านการล้างเส้นใยนี้จะมีสภาพเป็นกรดเพราะมีสารละลายเคมีเจือปนอยู่ คือ กรดซัลฟิวริก ไฮเดียมซัลเฟต และสังกะสีซัลเฟต ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตเส้นใย

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น
pH		1.7
Nitrogen, TKN	mg/l N	5
Phosphate, Total	mg/l P	3.2
BOD 5 days	mg/l	1,900
COD, Total	mg/l	3,440
Fat, Oil & Grease	mg/l	5.7
Solid, Total	mg/l	23,700
Solid, Dissolved	mg/l	23,600
Solid, Suspended	mg/l	100
Zinc, Total	mg/l Zn	155

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

2. น้ำเสียประเภทที่สอง เป็นน้ำเสียที่มาจากแหล่งต่างๆ ภายในโรงงาน เช่น น้ำล้างในกระบวนการผลิตที่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสี น้ำเสียจากระบบหล่อเย็น น้ำเสียจากการล้างเครื่องกรอง และน้ำเสียจากกิจกรรมอื่นๆ เป็นต้น

## 2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยสรุปวิธีการบำบัดต่างๆ ได้ดังนี้

### 2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชื่นชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ โดยที่เรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่แต่จะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งถ้าเรซินเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation exchanger) แต่ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและจะต้องทำการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Manahan, 1993)

### 2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction)

กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันเป็นวิธีการทางเคมีอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการบำบัดจะทำการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนลงไปได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต ไครเมตและไนเตรต เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน(II) ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

### 2.3.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis)

กระบวนการรีเวิร์ส ออสโมซิส เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน semi permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่จะใช้จึงต้องทนต่อแรงดันได้สูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้น ได้แก่ การปรับค่าพีเอช การแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดส์รุนแรงออก และการกรองสารแขวนลอยออกเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรนเป็นต้น

### 2.3.4 การระเหย (Evaporation)

วิธีการระเหยน้ำออกจัดเป็นวิธีที่ง่าย ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum evaporation) วิธีการบำบัดนี้จะได้ดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

### 2.3.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electro dialysis)

กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิสเป็นวิธีการที่ใช้แยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้ใช้ต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการกำจัดได้

### 2.3.6 การดูดติดผิว (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารมลทินที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรง



ภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นๆได้ เช่น ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าไปใกล้สารดูดติดผิว

### 2.3.7 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้

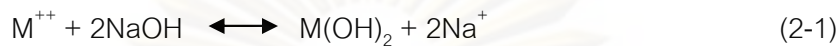
ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอช หลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ตารางที่ 2.2 ได้แสดงค่าพีเอชที่เหมาะสม และชนิดของสารเคมีที่ใช้เติมผสมลงไป เพื่อกำจัดหรือแยกมลสารออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าในแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดผลึกในรูปของหินปูน ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมออกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้นมีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

### 1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนที่อยู่ในสารละลาย และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-1 โดย  $\text{M}^{++}$  คือโลหะไอออน

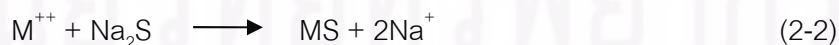


การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชที่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนจากค่าที่โลหะหนักสามารถตกตะกอนเป็นผลึกโลหะไฮดรอกไซด์ได้

ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาพวะที่เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน (Freeman, 1989)

### 2. การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง นอกจากการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ สารเคมีที่มักนิยมมาใช้ คือ โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{NaHS}$ ) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) โดยทำการเติมลงในสารละลายเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออน และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-2 โดย  $\text{M}^{++}$  คือ โลหะไอออน

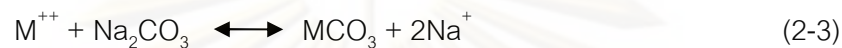


ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์ไม่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์นี้มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการทำให้พีเอชมีค่ามากกว่า 8 ข้อเสียอีกข้อ คือจะมีปริมาณของซัลไฟด์

อนมากเกินไปในน้ำที่จะปล่อยออก จึงต้องมีการบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำเสียออก (Freeman, 1989)

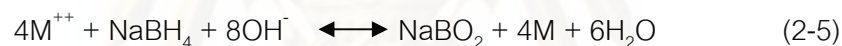
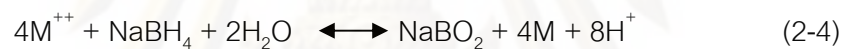
### 3. การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate precipitation)

สำหรับโลหะบางตัว เช่น แคลเซียม ตะกั่ว การตกตะกอนคาร์บอเนต ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า



### 4. การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride precipitation)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ ที่สามารถใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักได้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับค่าพีเอช แสดงปฏิกริยาได้ดังนี้



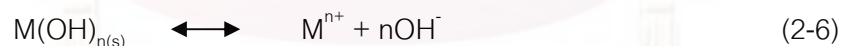
กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงพีเอช 8- 11 ที่พีเอชต่ำกว่า 8 การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ ขณะที่พีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกริยาจะลดลง พีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยการทดสอบความสมดุลของการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาของการทำปฏิกริยา และคุณภาพของน้ำที่ปล่อยออกมา (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ (เกรียงศักดิ์, 2539)

มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย	สารเคมีที่เติมลงไป	ค่าพีเอชที่เหมาะสม	สารเคมีที่ตกตะกอนได้
Aluminum	Lime	5	Al(OH) <sub>3</sub>
Arsenic	Ferric Chloride	8	AsCl <sub>2</sub>
Barium	Sodium sulfate	10	BaSO <sub>4</sub>
Cadmium	Lime	9.5 - 12	Cd(OH) <sub>2</sub>
Chromic	Lime	8.0 - 9.5	Cr(OH) <sub>3</sub>
Cupric	Lime	9.0 - 10.0	Cu(OH) <sub>2</sub>
Ferric	Lime	7	Fe(OH) <sub>3</sub>
Fluoride	Lime	12	CaF <sub>2</sub>
Manganese	Lime	10	Mn(OH) <sub>2</sub>
Silver	Sodium Chloride	8	AgCl
Selenium	Sodium Sulfide	6.5	SeS <sub>2</sub>
Mercury	Sodium Sulfide	8.5	HgS

### 5. ความสามารถในการละลาย

เมื่อพิจารณาสมดุลในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และค่าคงที่สมดุลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้



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

ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับของแข็งจะถูกเขียนโดยของแข็งเป็นสารตั้งต้น โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี ค่าคงที่สมดุลถูกแสดงด้วยตัวห้อย S แล้วตามด้วยจำนวนลิแกนด์ เขียนเป็นสัญลักษณ์  $K_{si}$  ซึ่งจะถูกใช้แสดงถึงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่มีของแข็งเป็นสารตั้งต้น ที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี และสารเชิงซ้อนที่มีจำนวน  $i$  ลิแกนด์เป็นผลิตภัณฑ์ (Benjamin, 2002)

สรุปเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนด้วยสารเคมีต่างๆ ดังตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบการตกตะกอนแบบต่างๆ (Freeman, 1989)

การตกตะกอน	ไฮดรอกไซด์	ซัลไฟด์	คาร์บอเนต	โบโรไฮดรอกไซด์
ข้อดี	1.ราคาถูก	1.ความสามารถในการละลายน้ำของตะกอนต่ำ 2.รีดน้ำออกจะตะกอนได้มากกว่าไฮดรอกไซด์	1.กรองตะกอนได้มาก	1.ใช้กับการนำกลับของโลหะ 2.เกิดตะกอนน้อยกว่าไฮดรอกไซด์
ข้อเสีย	1.เกิดตะกอนมาก 2.ละลายกลับได้เมื่อพีเอชเปลี่ยน	1.ราคาแพง 2.มีโอกาสเกิดแก๊สไฮโดรเจนหากไม่มีการควบคุมที่ดี	1.ใช้กับโลหะได้ไม่ทุกชนิด 2.เกิดตะกอนมากกว่าไฮดรอกไซด์	1.ใช้ได้กับช่วงพีเอชสั้นคือ 8-11

### 2.3.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยอิออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด ซึ่งแคโทดที่ใช้ในอุตสาหกรรมนี้จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ conventional metal cathode กับ high surface area cathode (HSAC) แอโนดและแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยที่แคโทดมักจะทำด้วยเหล็กกล้าหรือสแตนเลสสตีล (Stainless steel) หรือ carbon fiber ส่วนแอโนดมักจะทำด้วย platinized titanium, ruthenized titanium, ตะกั่ว และแกรไฟต์ เป็นต้น การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดได้ดีขึ้น ถึงที่ใช้ในการแยกควรจะทำให้มีน้ำกระเพื่อมหรือมีการกวน เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ของแคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90-95 แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

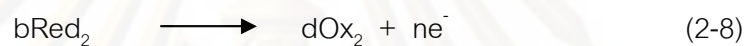
## 2.4 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการทำวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจะหมายถึง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งประกอบด้วยส่วน

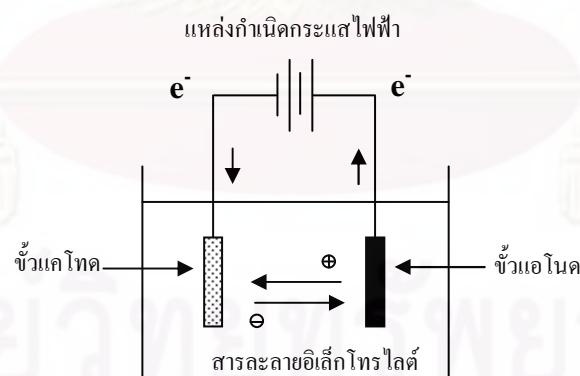
สำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ ขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2-3 ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า ขั้วแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2-4 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีแสดงดังรูปที่ 2.2

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

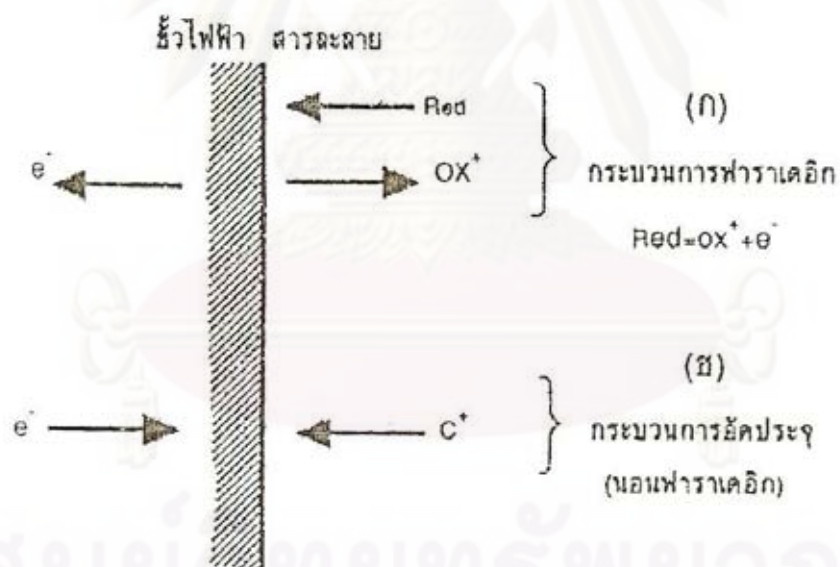


รูปที่ 2.2 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์, 2547)

### 2.4.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการดังกล่าวนี้ที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นได้ เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic current)

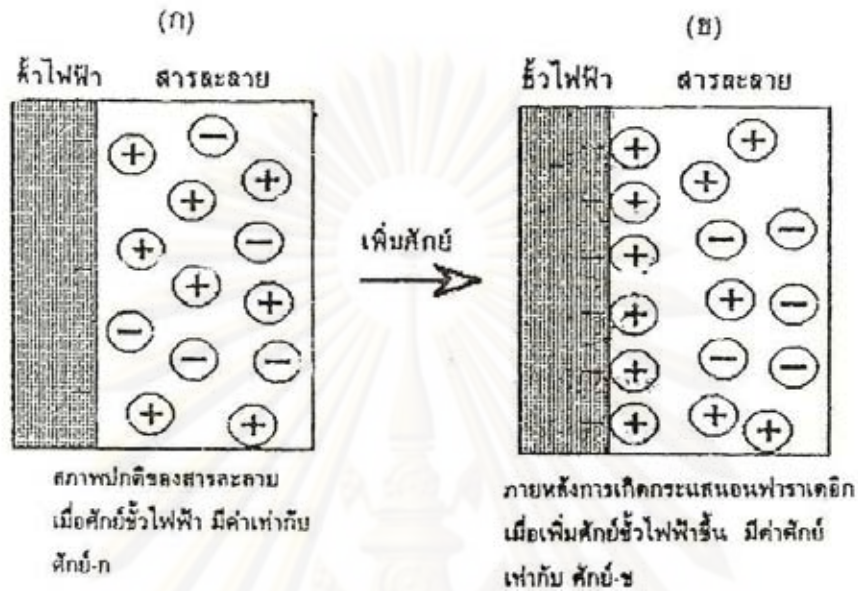
ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Non-faradaic process) กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non-Faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี, 2539)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี แต่ขึ้นกับสภาวะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยา

รีดออกซึ่งขึ้น ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี, 2539)

ในรูปที่ 2.4 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์ -ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายทั่ว สารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.4 (ข) สมมุติให้เท่ากับ -ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์ -ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็นกระแสไอออนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย



- ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้
- ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนพาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสพาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารดีโพลาไรเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนั้นถูกเรียกว่า ขั้วดีโพลาไรซ์

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสในวงจรอย่างต่อเนื่อง และสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยา การรับและคายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสและศักย์ย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาไรเซชัน ขณะที่เกิดโพลาไรเซชันขั้วไฟฟ้าถูกโพลาไรซ์ ทำให้กระแสในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาไรเซชันหมดไป จำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์แก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential overvoltage)

## 2.4.2 โพลาไรเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพลาไรเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization) เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่งสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลาย และขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีส่วนทำให้เกิดโพลาไรเซชันขึ้นไม่มากนัก ซึ่งผลของการเกิดโพลาไรเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจร เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรเป็นไปตามปกติ

2. โพลาไรเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization) เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า

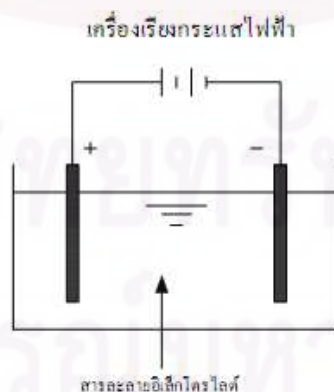
เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออนจะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

## 2.5 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอน โดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง (Mollah, 2004) สำหรับการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้

### 2.5.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

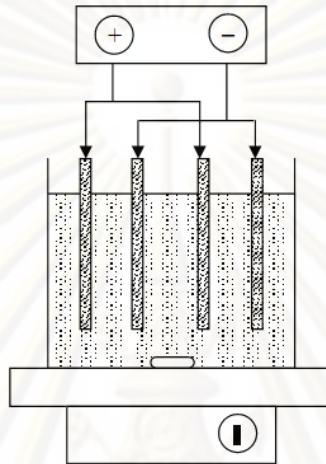
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pretorius, 1991)

### 2.5.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel)

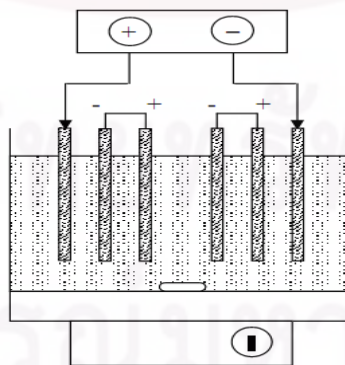
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมโนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)

### 2.5.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)

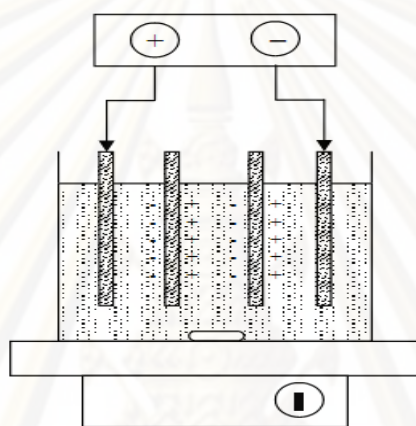
มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกันโดยมีการเชื่อมจุดอิเล็กโทรดเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

### 2.5.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode)

มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

## 2.6 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

รูปแบบการควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

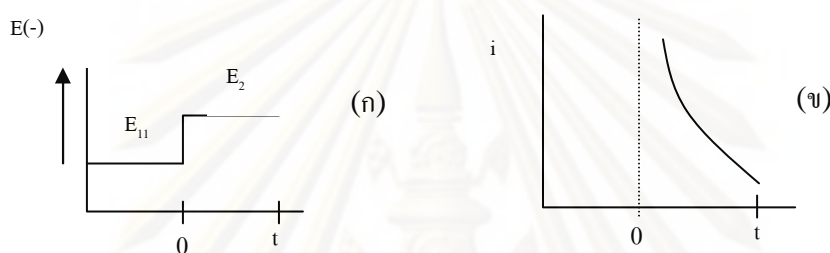
### 2.6.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)

เป็นการควบคุมความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับความต่างศักย์ที่เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลงเพื่อควบคุมความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่



ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์จาก  $E_1$  เป็น  $E_2$  ที่ชั่วแคโทด

โดยที่  $E_1$  คือ ความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ  $E_2$  คือ ความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ( $I = kC$ )



**รูปที่ 2.9** (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่  
(Friedrich, 1962)

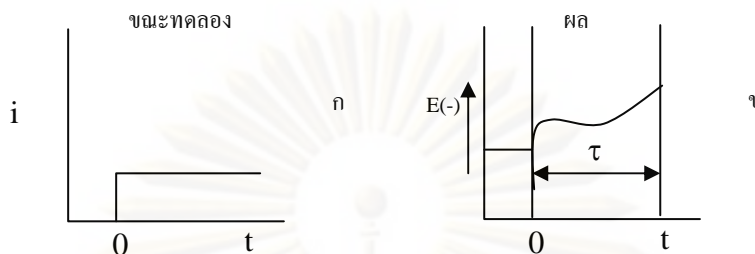
## 2.6.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ ( $M^{n+}$ ) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ ( $M$ ) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2-5



ดังนั้นความต่างศักย์จะแปรตามความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง  $M^{n+} / M$  ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ  $M^{n+}$  ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง

ความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time ( $\tau$ ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
(Friedrich, 1962)

## 2.7 ขั้วไฟฟ้า

ในแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น แพลตินัม ไททาเนียม อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์ เป็นต้น โดยมีลักษณะและคุณสมบัติในแต่ละชนิด ดังนี้

### 2.7.1 แพลตินัม (Platinum)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของแพลตินัม คือ มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งนับว่าสูงมาก เลขออกซิเดชันมีค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญ คือ +2 ถึง +4 เท่านั้น แพลตินัมเป็นโลหะที่มีลักษณะเป็นเงา สีมันวาว และมีความอ่อนกว่าธาตุชนิดอื่นๆ จึงสามารถดัดให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ คล้ายกับเงินและทอง คุณสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก และไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา จึงเหมาะกับการนำไปทำขั้วไฟฟ้า เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง แต่ไม่ถูกนิยมนำมาใช้เนื่องจากมีราคาที่สูงมาก

### 2.7.2 ไททาเนียม

ไททาเนียมเป็นโลหะธาตุทรานซิชันอยู่หมู่เดียวกับเซอร์โคเนียมและฮาฟเนียม โดยมีลักษณะเป็นสีขาวคล้ายเงิน แข็ง และไม่เปราะ และบรรดาโลหะในหมู่ธาตุทรานซิชันทั้งหมดพบว่าไททาเนียมมีความหนาแน่นน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิปกติไททาเนียมจะไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ไททาเนียมจะทำปฏิกิริยารุนแรงกับออกซิเจน เกิดเป็นสารประกอบต่างๆ เช่น  $TiCl_4$  หรือ  $TiO_2$  เป็นต้น และยังสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นไดออกไซด์กับไฮโดรเจน เลขออกซิเดชันของไททาเนียมมีตั้งแต่ +2 ถึง +4 แต่ที่สำคัญและเสถียรที่สุดในสภาวะต่างๆ คือ +4

### 2.7.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากเป็นอันดับ 3 ในเปลือกโลก โดยมีลักษณะเป็นสีขาว น้ำหนักเบา และแข็งมาก แต่ไม่เปราะ จึงสามารถทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เช่น ใช้ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและน้ำหนักเบา อะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับโลหะตัวอื่นๆ ได้อย่างว่องไว มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 และถ้าหาก  $Al^{+3}$  อยู่ในน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและไฮโดรไลซิสขึ้นได้

### 2.7.4 เหล็ก

เหล็กเป็นโลหะที่มีอยู่ในเปลือกโลกและถูกพบมากเป็นอันดับ 2 รองลงมาจากอะลูมิเนียม โดยมีลักษณะเป็นโลหะแข็ง มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ปานกลาง เลขออกซิเดชันของเหล็กที่พบบ่อยและมีความเสถียรมีค่า +2 และ +3 อยู่ปนกันไป แต่เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นมีความเสถียรมากและมีความสามารถในการเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่มี  $Fe^{+2}$  เป็นส่วนประกอบนั้นเมื่ออยู่ในน้ำหรือสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์  $(Fe(H_2O)_6)^{+2}$  และสามารถถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศหรือออกซิเจนกลายเป็น  $Fe^{+3}$  ซึ่งแสดงสมบัติเป็นกรด เนื่องจาก  $Fe^{+3}$  มีขนาดไอออนเล็กและมีจำนวนประจุมาก ทั้ง  $Fe^{+2}$  และ  $Fe^{+3}$  สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้ ส่วนค่าออกซิเดชันที่สูงกว่านี้ก็ถูกพบแต่ไม่เสถียร เหล็กสามารถทำปฏิกิริยารวมกับออกซิเจนได้เกือบทั้งหมดเมื่อทำให้อุ่น แต่จะไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย

เหล็กเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง โดยถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นจะพบว่าที่ผิวของเหล็กจะมีสีน้ำตาลเกิดขึ้นที่เรียกว่าสนิมเหล็ก

### 2.7.5 แกรไฟต์

แกรไฟต์เป็นอันตรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะที่บดแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์บอนด์แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

## 2.8 ศักย์ขั้วไฟฟ้า

คำจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งการที่ต้องกำหนดขั้วแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนก็เพื่อให้อ้างอิงและสามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน และในการกำหนดเครื่องหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC ได้กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาศักย์ไฟฟ้า และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่ง ให้ถือว่า ค่าผลลัพท์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้นๆ

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

จากที่กล่าวในหัวข้อข้างต้นของศักย์ขั้วไฟฟ้า ที่เซลล์ขั้วไฟฟ้ามีขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วแคโทด และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่งจะถือได้ว่า ค่าผลลัพท์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้นๆ โดยในความหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้านี้ จะหมายถึงศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่หาได้ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉพาะของแต่ละครึ่งเซลล์ โดยที่สามารถนำมาเปรียบเทียบถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์หนึ่งๆที่มีค่าแอกทิวิตี



เป็นหนึ่งในไปสู่ออกทวิติที่ในสภาวะสมดุลได้ โดยมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าคงที่ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ( $E^\circ$ ) ดังนี้

1. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ โดยที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดเสมอ
2. ตามสัญนิยมของไฟฟ้าเคมี ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น
3. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะไม่ผันแปรตามจำนวนโมลที่เกิดจากการใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
4. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ จึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิพร้อมกับค่าของ ( $E^\circ$ ) ด้วยเสมอ
5. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยตัวเลขและเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายบวกหรือลบจะมีความหมายที่แตกต่างกัน คือ เครื่องหมายบวก จะหมายถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ในที่นี้ขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาจะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ส่วนเครื่องหมายลบ จะบ่งบอกถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

### 2.8.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ ( $E_R$ )

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ การที่กระแสจะไหลครบวงจรของเซลล์ได้นั้น ต้องมีพลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งที่เพียงพอต่อการเอาชนะความต้านทานของวงจร ซึ่งศักย์ไฟฟ้าจำนวนนี้คือ ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential) โดยมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสกับความต้านทาน (IR) ดังนั้นค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม จึงต้องมีเทอมของศักย์ไฟฟ้าจากความต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังสมการ

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

### 2.8.3 ศักย์จากการเกิดโพลาไรเซชัน ( $E_p, \pi$ )

โพลาไรเซชันเกิดขึ้นได้ 2 แบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.2 คือ เกิดเนื่องมาจากผลของความเข้มข้นและแบบจลน์ ซึ่งต้องแก้ไขโดยการเพิ่มประมาณของกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นหรือทำการเพิ่มศักย์ของวงจรให้สูงขึ้น ศักย์ที่ถูกเพิ่มนี้จะเรียกว่า 'ศักย์เกินตัว'

(Overpotential,  $\eta$ ) จึงทำให้ค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวมต่างจากค่าอุณหพลวัตจากการคำนวณ ดังนั้นถ้ามีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ การแสดงค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม เป็นดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R - \eta \quad (2-12)$$

## 2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

การไหลของกระแสที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำเซลล์ไฟฟ้า โดยต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 จูล เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ และจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์ ดังสมการ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (2-13)$$

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุที่อยู่ในหน่วยคูลอมบ์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปฏิกิริยา โดยทุกๆ 1 โมลของอิเล็กตรอน จะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ หรือ F คูลอมบ์ ซึ่ง F ก็คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ ดังนั้นสมการที่แสดงถึงงานทางไฟฟ้าสุทธิที่มีหน่วยของอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ก็คือ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = nF \times \text{โวลต์} \quad (2-14)$$

### 2.9.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งวัดได้ในหน่วยของแอมแปร์ (Amp) โดยจำนวนของกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด จะถูกวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density,  $I$ ) ส่วนการวัดกระแสที่ผ่านเข้าไปในวัสดุจะเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ซึ่งโลหะโดยส่วนใหญ่ นั้นจะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า ( $E_r$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็น volt/cm ได้คือ

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

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

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

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

### 2.9.2 ความนำไฟฟ้า

ความนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และ ปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ส่วนความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะหมายถึง ความต้านทานที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นไปตามสมการ คือ

$$R = L / (C \times A) \quad (2-18)$$

โดย	R	=	ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น โอห์ม
	L	=	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
	C	=	ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น ซีเมน
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.9.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า  $Q$  คูลอมบ์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในเวลา  $t$  วินาที

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

พลังงานไฟฟ้า ( $W$ ) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา  $t$  วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น  $E$  โวลต์

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

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

กำลังไฟฟ้า (Watt,  $P$ ) คำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

$$P = W / t \quad (2-22)$$

### 2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (อินทิตรา, 2539)

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทด ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยใช้ปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ไอเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2-23

$$F \text{ (Faraday)} = e \times N \quad (2-23)$$

$$F \text{ (Faraday)} = (1.62 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23}) \quad (2-24)$$

$$F \text{ (Faraday)} = 96,487 \text{ C mol}^{-1} \quad (2-25)$$



$$\text{หรือ} \quad 1 \text{ Faraday} = 96,500 \text{ C mol}^{-1} \quad (2-26)$$

$$X \text{ Coulomb} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)} \quad (2-27)$$

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = M I t / nF \quad (2-28)$$

โดย	W	=	มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี มีหน่วยเป็น gram
	n	=	จำนวนโมลของตัวออกซิไดส์ตามสมการเคมี มีหน่วยเป็น eq/mol
	M	=	มวลโมเลกุล มีหน่วยเป็น gram/mol
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง มีหน่วยเป็น amp

## 2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะ กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จากสมการที่ 2-29

$$\text{Current efficiency (t) \%} = \frac{nF(C_o - C_t) V \times 100\%}{\int_0^t I(t) dt} \quad (2-29)$$

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

## 2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ, 2545)

ทิศทางของอิออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุอิออน ความสามารถของอิออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุบอิออนและขนาดอิออน
3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้ว ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า และจำนวนกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่อิออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
6. จำนวนประจุของอิออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ

## 2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Scott และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงการนำกลับของโลหะดีบุก ตะกั่ว และทองแดง จากสารละลายที่ได้จากการล้างแผงวงจรไฟฟ้า โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร ในการศึกษานี้มีสองวิธีในการนำกลับโลหะ วิธีการแรก คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับโลหะทั้งหมด วิธีการที่สอง คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการเกิดการพอกพูนของทองแดงและทำให้เกิดการตกตะกอนของดีบุกและตะกั่ว ซึ่งนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเข้าเตาเผา การใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร เพราะสามารถใช้ในการนำกลับโลหะโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้ และลดการเกิดหมอกระหว่างการล้างแผงวงจร ในวิธีการแรกแยกดีบุกออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง เนื่องจากเกิดไฮเดรตทินไดออกไซด์ ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และนำกลับได้โดยการใช้ไฟฟ้าเคมี โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไททานเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้วสารละลายที่มีไอออนของทองแดงและตะกั่วจะสามารถนำกลับด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุก และจะได้ค่า

ประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับของโลหะ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นการประหยัดถ้าหากเทียบกับการตกตะกอนด้วยต่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับของแดงโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยรวมกันกับการตกตะกอนดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ  $PbSO_4$  และ  $SnO_2$  จะถูกส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี เพราะว่าในการเผาไหม้จะเกิดก๊าซ และเกิดกากโลหะขึ้น

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน การศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่ากระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สาม คือ การเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลักเมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่ากระแสมากที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

มะลิ หุ่นสม (2544) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี เพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรก คือ การนำกลับคืนของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับของโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่สามเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10, 90 และ 190 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ (2545) ได้ศึกษาถึงการแยกสังกะสีออกจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสี โดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงชุบเพชรเกษมซึ่งใช้น้ำยาชุบสังกะสีชนิดไฮยาโนด์ และน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ขั้วแคโทดเป็นแคตโนลีส และตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่รถยนต์เป็นขั้วแอโนด จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 500 ส่วนในล้านส่วน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร เท่ากับร้อยละ 96.7 และมีประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับร้อยละ 7.08 ในส่วนของน้ำเสียจริงที่ความหนาแน่นของกระแส 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีเท่ากับร้อยละ 97.9 และมีประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับร้อยละ 8.26

Carlos และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของทาร์เทรต ต่อการเกิดการพอกพูนของทองแดงและดีบุก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีจากสารละลายที่ไม่มีไฮยาโนด์ การพอกพูนของทองแดงและดีบุกที่ขั้วไฟฟ้า พบว่า ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.31 โวลต์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 66-68.5% ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 31.5-34% และที่ศักย์ไฟฟ้า -0.64 โวลต์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 45-51% ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า 49-55% และจากการศึกษา จะพบว่าทาร์เทรตจะเพิ่มอัตราการเกิดผลึก และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าของกระแสที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า ทั้งที่มีและไม่มีทาร์เทรตเกิดขึ้นที่ 11 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตาม การมีทาร์เทรตจะทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าในการเกิดการพอกพูนของโลหะที่ขั้วไฟฟ้า นำไปสู่การใช้พลังงานที่ต่ำกว่าในการเกิดการพอกพูนของโลหะที่ขั้วไฟฟ้า และนำไปสู่การใช้พลังงานที่ต่ำกว่าตามไปด้วย

Garcia-Gabaldon (2005) ได้ทำการศึกษาการนำกลับดีบุกและทองคำขาว โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยกระบวนการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ถึงปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีมีไดอะแฟรมเซรามิกถูกใส่เข้าไป เมื่อไม่มีทองคำขาวอยู่ศักย์ขั้วไฟฟ้าจะเป็นลบมากกว่า การเปลี่ยนรูปของดีบุกมีมากขึ้น เพราะว่าที่ขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะไม่ราบเรียบและเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ในขณะที่เดียวกันประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลง และพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับดีบุกก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะว่าเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด เงื่อนไขของการทดลอง คือ ศักย์ที่ขั้วแคโทดประมาณ -1.0 โวลต์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ที่อิ่มตัวด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ ไอออนดีบุกจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและเกิดเป็นดีบุก ไอออนของทองคำขาวส่งผลต่อการเกิดการพอกพูนของดีบุก ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.4 โวลต์ การนำกลับของโลหะทั้งสองมีความเป็นไปได้ที่จะถูกแยกออกจากกัน การมีไอออนทองคำขาวอยู่ จะเพิ่มให้เกิดการพอกพูนของดีบุกที่ศักย์เป็นบวก



มากกว่า -0.6 โวลท์ ที่ค่าศักย์ดังกล่าวถือเป็นค่าที่ต่ำที่สุดของพลังงานที่ใช้ และทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่ามากกว่า 70% อีกทั้งเป็นค่าที่ดีของการเปลี่ยนสภาพในรูปไอออนของทั้งดีบุก 100% และทองคำขาวได้มากกว่า 90%

ศรายุทธ (2549) ได้ทำการศึกษากำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย ศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้ว พื้นที่ผิว อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ แบบขนาน ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดมากกว่าร้อยละ 99 ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ระยะระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสียเข้าถึง 21.11 มิลลิลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

อภิรดี สุนทรภา (2549) ได้ทำการศึกษากำจัดปรอทที่ใช้การตกตะกอนทางเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ และวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง เพื่อการนำกลับของดีบุก ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษากำจัดตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ พบว่า ที่พีเอช 3 สามารถนำกลับดีบุกได้ 56.03% และที่พีเอช 2 สามารถนำกลับดีบุกได้ 79.68% ตามลำดับ ส่วนที่สองศึกษาวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ชนิดขั้วแอโนดเป็นแกรไฟต์และขั้วแคโทดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถนำกลับดีบุกได้ 100% โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $6.5 \times 12$  ตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร ส่วนที่สามศึกษาวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริงโดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่สองมาทำการทดสอบ พบว่า ให้ค่าการนำกลับดีบุก 86.86% และจากการศึกษา พบว่า ค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าเคมีมีค่าสูงกว่าการตกตะกอน แต่การนำกลับดีบุกด้วยไฟฟ้านั้นจะให้ดีบุกบริสุทธิ์ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

Emamjomeh และ Savakumar (2008) ได้ทำการศึกษากำจัดฟลูออไรด์ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ และใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่า จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแส 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พีเอชเท่ากับ 6 อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ขาเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

## บทที่ 3

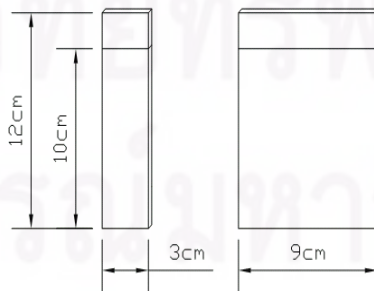
### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย 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. ปีกเกอร์ขนาด 1.5 ลิตร
8. ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิกขนาด 1.8 ลิตร
9. กระดาษกรอง (Filter paper) : Whatman
10. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
11. ขั้วไฟฟ้า มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ ขนาด 3 x 10 ตารางเซนติเมตร และ 9 x 10 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1



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,  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) : QP Panreac
4. สังกะสีไนเตรต (Zinc Nitrate,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) : Ajax
5. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl) : Carlo ERBA

### 3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

#### น้ำเสียสังเคราะห์

1. ทดสอบการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์  
เตรียม Zn ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยตักสาร  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ในปริมาณ 2.8 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 4,000 มิลลิลิตร
2. ทดสอบการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์  
เตรียม Zn ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยตักสาร  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ในปริมาณ 2.8 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 4,000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับพีเอชให้มีค่า 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร (เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจน)
3. ทดสอบด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี  
เตรียม Zn ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยตักสาร  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ในปริมาณ 2.8 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 4,000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 11.3 โมลต่อลิตร ในปริมาณ 3.54 มิลลิลิตร สุดท้ายทำการปรับความนำไฟฟ้าให้มีค่า 12 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร ด้วยโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 16 กรัม (เป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจริง)

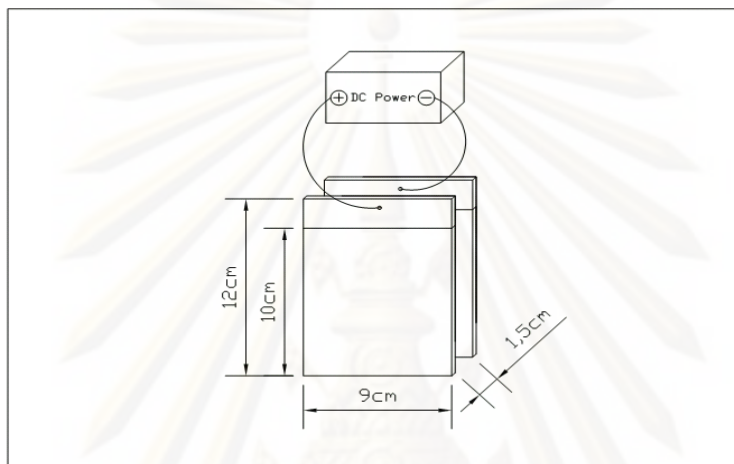
#### น้ำเสียจริง

น้ำเสียจริง เป็นน้ำที่เก็บจากส่วนปล่อยทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย

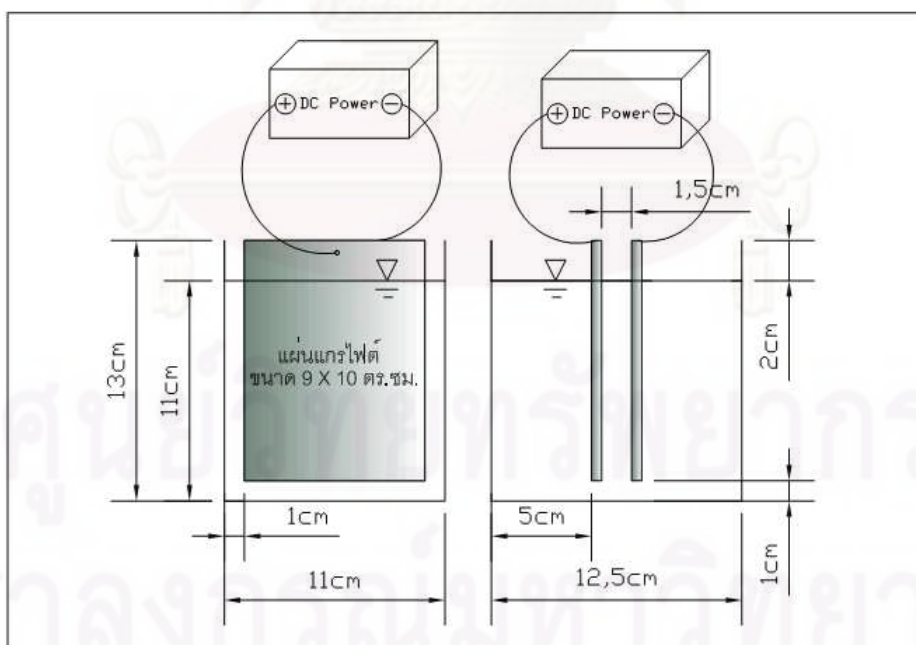
### 3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่

1. เตรียมสารละลาย ปริมาตร 1.5 ลิตร ในถังปฏิกิริยาขนาด 1.8 ลิตร
  2. ขั้วบวกและขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับแผ่นแกรไฟต์ ที่มีขนาด 9 x 10 ตร.ซม. ขั้วละ 1 แผ่น
- การจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถึง 3.3



รูปที่ 3.2 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยวจำนวน 1 คู่

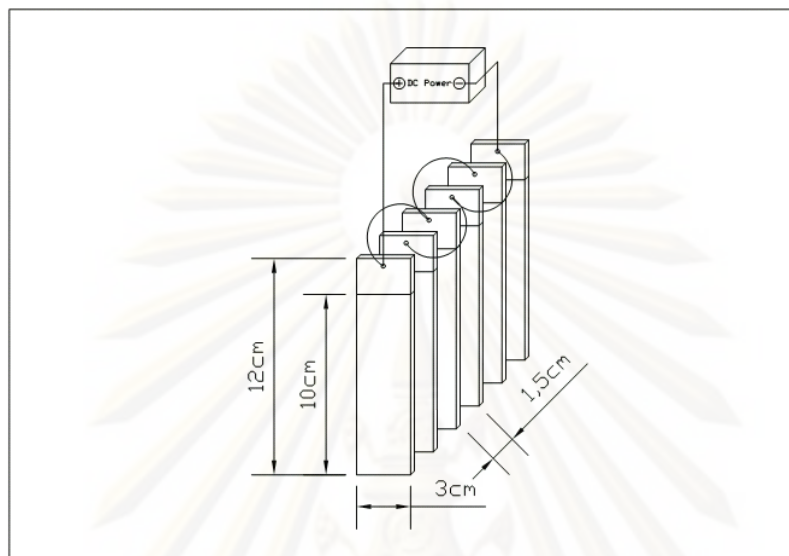


รูปที่ 3.3 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยวจำนวน 1 คู่

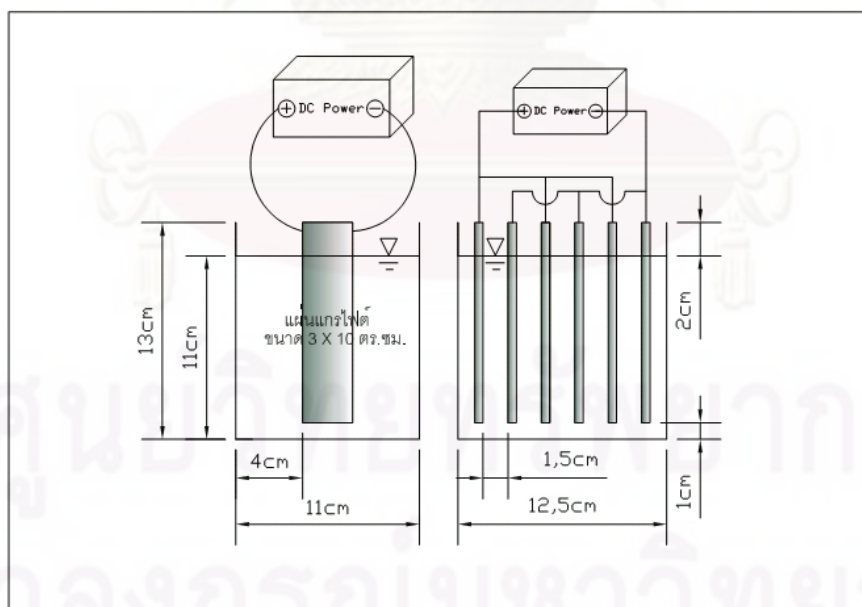


ชุดที่ 2 การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่

1. เตรียมสารละลาย ปริมาตร 1.5 ลิตร ในถังปฏิกิริยาขนาด 1.8 ลิตร
2. ขั้วบวกและขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับแผ่นแกรไฟต์ ที่มีขนาด  $3 \times 10$  ตร.ซม. ขั้วละ 3 แผ่น  
การจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ถึง 3.5



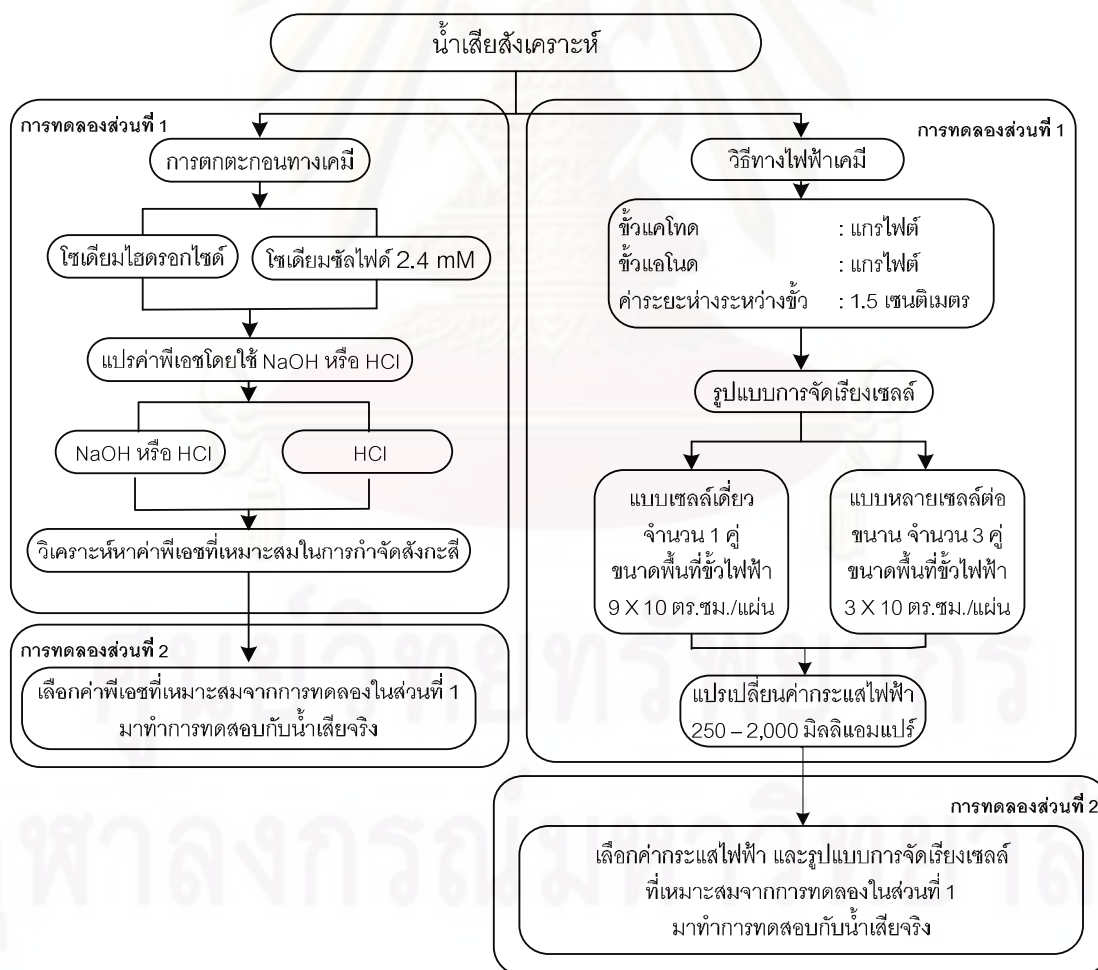
รูปที่ 3.4 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนานจำนวน 3 คู่



รูปที่ 3.5 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนานจำนวน 3 คู่

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนการทดลองหลัก คือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในวิธีการตกตะกอนทางเคมีจะเลือกใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม สำหรับวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะทำการศึกษาค่าตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า และรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า เพื่อเลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้า และรูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยมีผังแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.6 สำหรับการทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงของโรงงานผลิตเส้นใย โดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยจะเลือกใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการทดสอบ โดยมีผังแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผังการทำวิจัย

### 3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1

#### 1. การทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

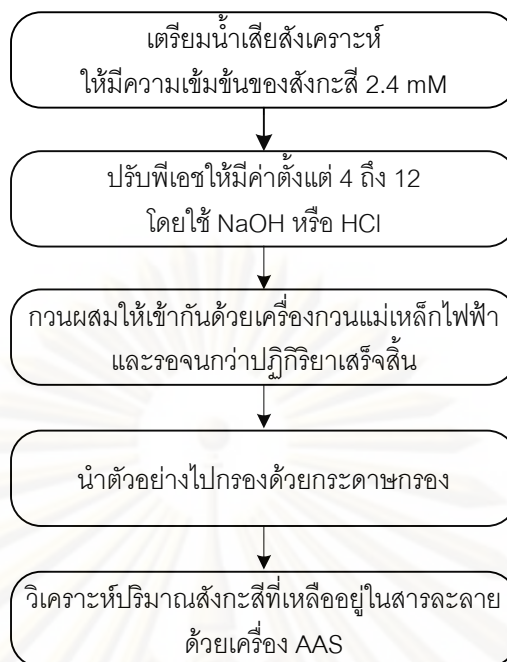
การทดลองการตกตะกอนทางเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเลือกใช้สารเคมีในการตกตะกอน 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์

1.1 การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังการทดลองรูปที่ 3.7 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ลงในปิកเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอช โดยทดสอบที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือกรดไฮโดรคลอริก
3. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและรอจนกว่าปฏิกิริยาจะเสร็จสิ้น
4. นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง
5. ตรวจสอบความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
6. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ	1. อุณหภูมิห้อง
2. สารที่ใช้ในการตกตะกอน	2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือกรดไฮโดรคลอริก
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. พีเอช	1. พีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 12
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการตกตะกอน	1. ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



**รูปที่ 3.7** วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

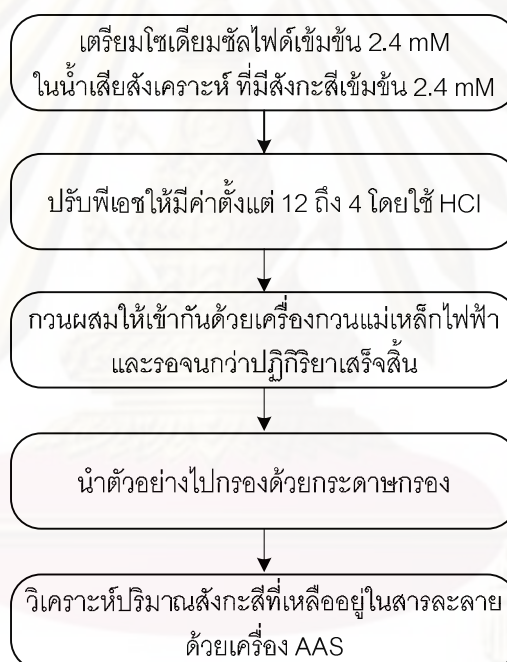
1.2 การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลไฟด์ เท่ากับ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าทฤษฎีจากสมการสมดุลเคมี โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังการทดลองรูปที่ 3.8 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของสังกะสีและโซเดียมซัลไฟด์ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ลงในบีกเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอช โดยทดสอบที่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 12 และสิ้นสุดที่ 4 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก
3. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและรอจนกว่าปฏิกิริยาจะเสร็จสิ้น
4. นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง
5. ตรวจวัดความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
6. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง



ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมซัลไฟด์  
ในน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ 2. สารที่ใช้ในการตกตะกอน	1. อุณหภูมิห้อง 2. โซเดียมซัลไฟด์ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. พีเอช	1. พีเอชตั้งแต่ 12 ถึง 4
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการตกตะกอน	1. ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



รูปที่ 3.8 วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์

## 2. การทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

การทดลองวิธีทางไฟฟ้าเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 เป็นการปรับเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $9 \times 10$  ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 ขั้ว ชุดที่

2 เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า  $3 \times 10$  ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 ขั้ว และแต่ละชุดการทดลองจะทำการแปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า 250 ถึง 2,000 มิลลิแอมแปร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ถึง 3.4 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองรูปที่ 3.9 ถึง 3.10 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

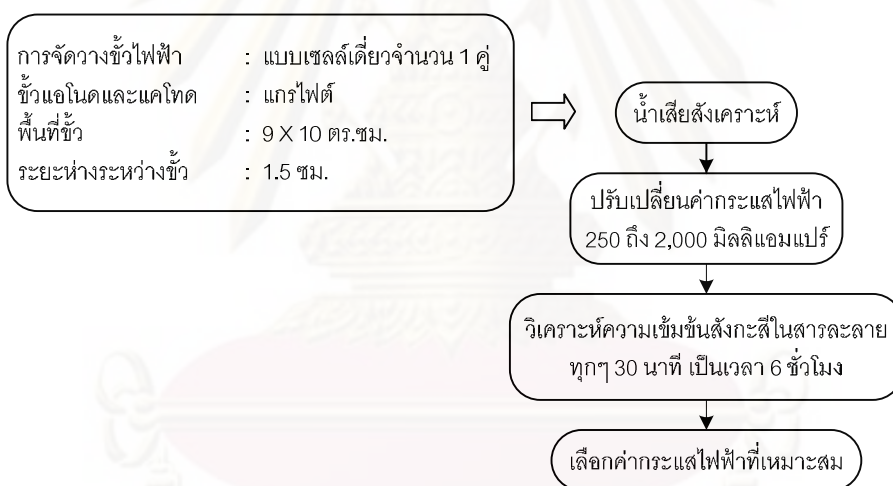
1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 1.5 ลิตร ในถังปฏิกิริยาขนาด 1.8 ลิตร
2. ทำการแปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ จากนั้นนำมาทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. ทุกชุดการทดลองทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

**ตารางที่ 3.3** ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่

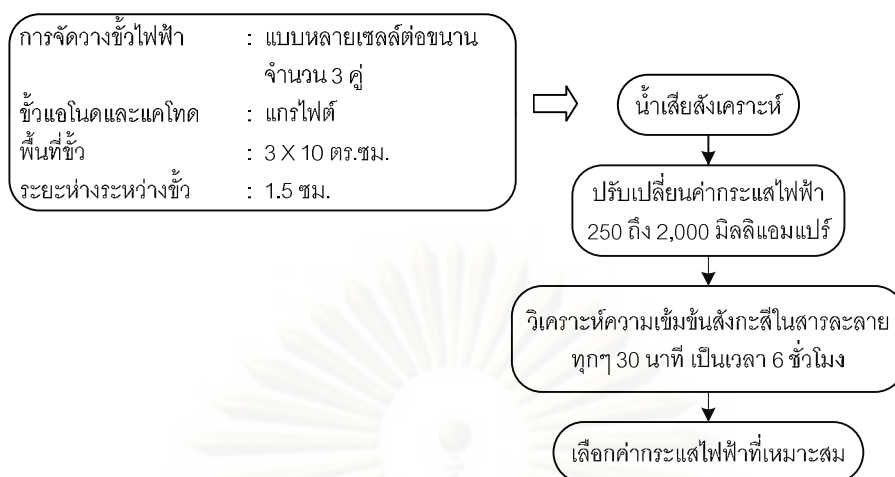
ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วแอโนดและแคโทด	1. แกร์ไฟต์
2. ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า	2. $9 \times 10$ ตร.ซม.
3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3. 1.5 เซนติเมตร
4. เวลาเก็บกัก	4. 6 ชั่วโมง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. กระแสไฟฟ้า	1. 250 ถึง 2,000 มิลลิแอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัด	1. ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสีในน้ำเสีย  
สังเคราะห์เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วแอโนดและแคโทด	1. แกรไฟต์
2. ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า	2. 3 x 10 ตร.ซม.
3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3. 1.5 เซนติเมตร
4. เวลาเก็บกัก	4. 6 ชั่วโมง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. กระแสไฟฟ้า	1. 250 ถึง 2,000 มิลลิแอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัด	1. ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



รูปที่ 3.9 วิธีการทดลองการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมของรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ  
เซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่



รูปที่ 3.10 วิธีการทดลองการหาค่าพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมของรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่

### 3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2

#### 1. การทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

การทดลองการตกตะกอนทางเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงโดยทำการเลือกใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์

1.1 การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยนำผลของตัวแปรที่ได้จากการศึกษาในส่วนของทดลองที่ 1 มาทดสอบกับน้ำเสียจริง เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังการทดลองรูปที่ 3.11 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

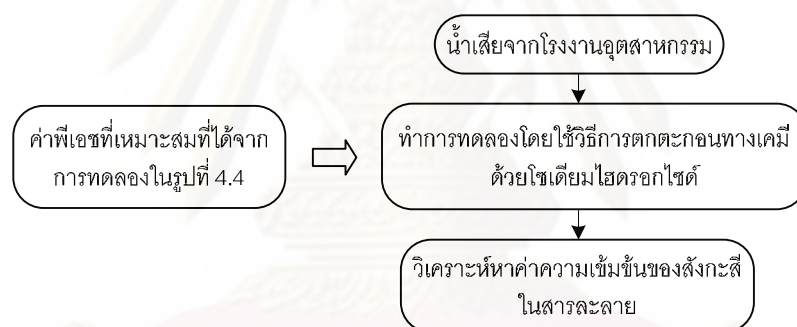
1. เตรียมน้ำเสียจริง ลงในบีกเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอช โดยใช้ค่าของพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่ 1 ของวิธีการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและรอจนกว่าปฏิกิริยาจะเสร็จสิ้น
4. นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง



5. ตรวจสอบวัดความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
6. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพของการตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ	1. อุณหภูมิห้อง
2. สารที่ใช้ในการตกตะกอน	2. โซเดียมไฮดรอกไซด์
3. พีเอช	3. ค่าเหมาะสมที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3.1
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการตกตะกอน	1. ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



รูปที่ 3.11 วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.2 การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ โดยนำผลของตัวแปรที่ได้จากการศึกษาในส่วนของการทดลองที่ 1 มาทดสอบกับน้ำเสียจริง เพื่อหาประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังการทดลองรูปที่ 3.12 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

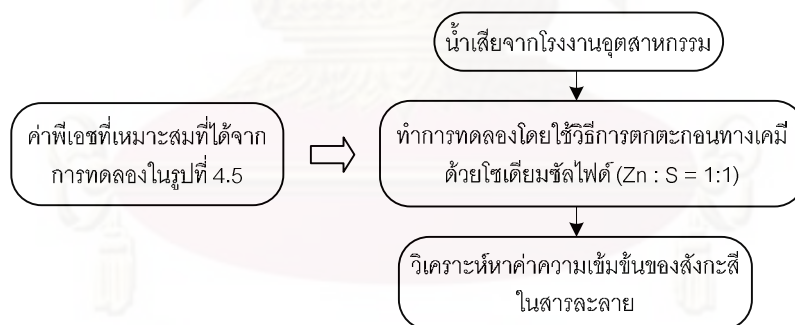
1. เตรียมน้ำเสียจริง ลงในบีกเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอช โดยใส่ค่าของพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่ 1 ของ

วิธีการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์

3. ทำการรบกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและรอจนกว่าปฏิกิริยาจะเสร็จสิ้น
4. นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง
5. ตรวจสอบวัดความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
6. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพของการตกตะกอนสังกะสีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ	1. อุณหภูมิห้อง
2. สารที่ใช้ในการตกตะกอน	2. โซเดียมซัลไฟด์ ( $Zn : S = 1:1$ )
3. พีเอช	3. ค่าเหมาะสมที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3.2
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการตกตะกอน	1. ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



รูปที่ 3.12 วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์

## 2. การทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

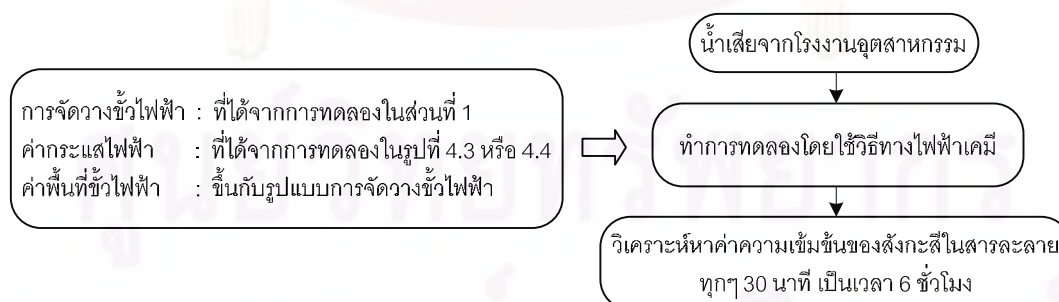
การทดลองวิธีทางไฟฟ้าเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง โดยเลือกค่าสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองใน ส่วนที่ 1 มาทำการทดสอบกับน้ำ

เสียจริง ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองรูปที่ 3.13 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียจริง ปริมาตร 1.5 ลิตร ในถังปฏิกิริยาขนาด 1.8 ลิตร
2. ทำการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า และรูปแบบการจัดวางเซลล์ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม จากการทดลองใน ส่วนที่ 2
3. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

**ตารางที่ 3.7** ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วแอโนด/แคโทด	1. แกรไฟต์/สังกะสี
2. รูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้า	2. รูปแบบเหมาะสมที่ได้จากการทดลองในส่วนที่ 1
3. กระแสไฟฟ้า	3. ค่าเหมาะสมที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3.3 หรือ 3.4
4. พื้นที่ขั้วไฟฟารวม	4. 180 ตารางเซนติเมตร
5. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	5. 1.5 เซนติเมตร
6. เวลาเก็บกัก	6. 6 ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัด	1. ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



**รูปที่ 3.13** วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

### 3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการทำวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าโลหะหนัก และค่าพีเอช ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

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



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์

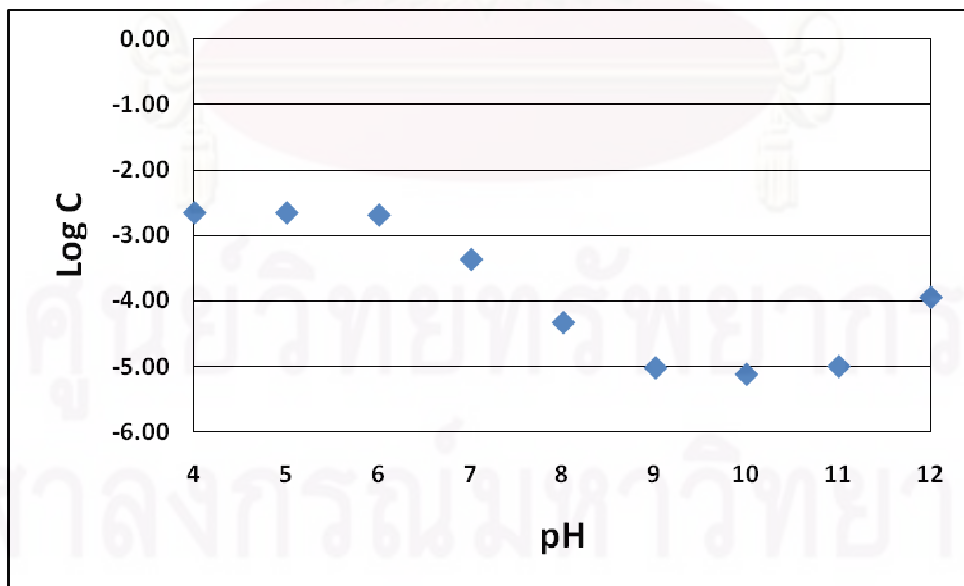
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี เท่ากับ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร (155 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ และประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของน้ำเสียจริง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

#### 4.1 การทดลองส่วนที่ 1

##### 4.1.1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

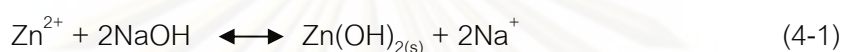
ในการทดลองนี้จะทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นจะทำการตรวจวัดหาความเข้มข้นของสังกะสีหลังการทดลอง ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

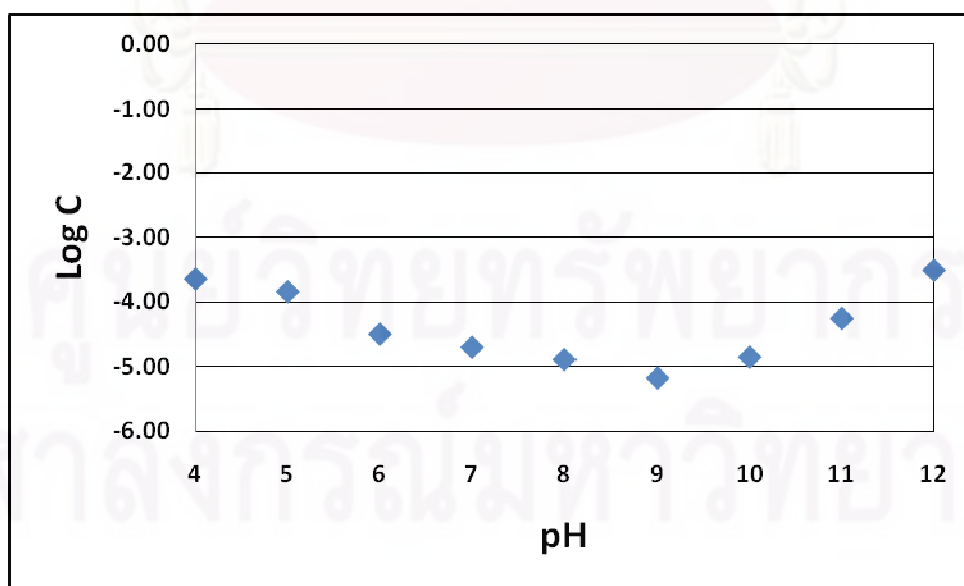
จากรูปที่ 4.1 พบว่า ที่พีเอชแตกต่างกัน จะมีความสามารถในการละลายของสังกะสีแตกต่างกัน โดยที่ความสามารถในการละลายนี้ จะแสดงถึงความสามารถในการตกตะกอน นั่นคือ ณ พีเอช ที่มีความสามารถในการละลายต่ำ จะสามารถตกตะกอนได้ดีหรือเกิดสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสี

จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 10 จัดเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมี Log ความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย -5.12 หรือคิดเป็น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.68% และพบว่าสังกะสีที่ถูกกำจัดอยู่ในรูปของตะกอน  $Zn(OH)_{2(s)}$  โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการนี้ (Freeman, 1989)



#### 4.1.2 การตกตะกอนด้วยไฮเดียมซัลไฟด์

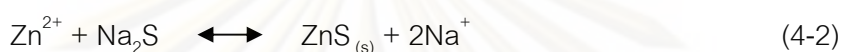
ในการทดลองนี้จะทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยในขั้นตอนแรกจะทำการปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าเท่ากับ 12 ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อหลีกเลี่ยงของการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) จากนั้นจึงเติมไฮเดียมซัลไฟด์ให้มีความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าทฤษฎีจากสมการสมดุลเคมี หลังจากนั้นจะเป็นการทดสอบหาค่าพีเอชที่เหมาะสมโดยการเติมกรดไฮโดรคลอริก และทำการตรวจวัดหาความเข้มข้นของสังกะสีหลังการทดลอง ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไฮเดียมซัลไฟด์

จากรูปที่ 4.2 พบว่า ที่พีเอชแตกต่างกัน จะมีความสามารถในการละลายของสังกะสีแตกต่างกัน โดยที่ความสามารถในการละลายนี้ จะแสดงถึงความสามารถในการตกตะกอน นั่นคือ ณ พีเอช ที่มีความสามารถในการละลายต่ำ จะสามารถตกตะกอนได้ดีหรือเกิดสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสี

จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 9 จัดเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสี โดยมี Log ความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย -5.17 หรือคิดเป็น 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.71% และพบว่าสังกะสีที่ถูกกำจัดจะอยู่ในรูปของตะกอน ZnS<sub>(s)</sub> โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการนี้ (Freeman, 1989)

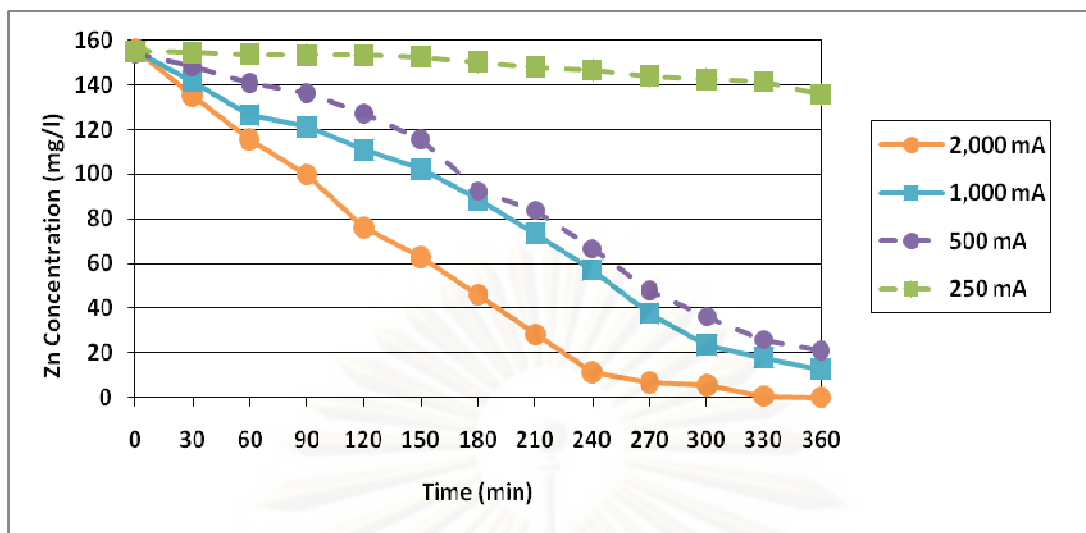


#### 4.1.3 การกำจัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

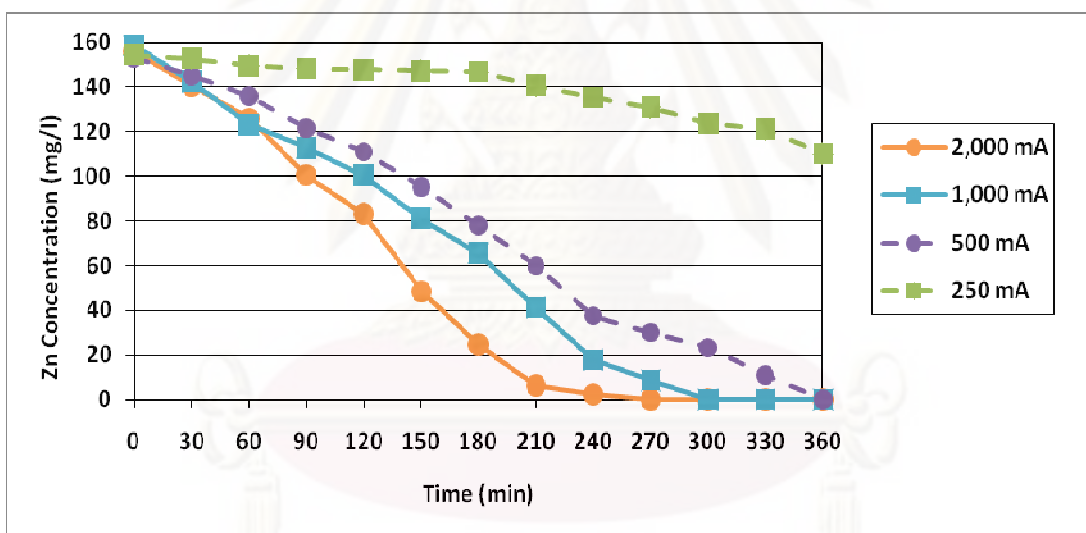
การทดลองนี้ได้ทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ โดยคิดเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) 13.89, 27.78, 55.56 และ 111.11 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และมีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย เท่ากันที่ค่า 12.41 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ของถังการจัดเรียงขั้วแบบเซลล์เดี่ยว และต่อขนาน ซึ่งเมื่อทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสังกะสี ความนำไฟฟ้า และพีเอช ในระหว่างการทดลองทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า ในระยะเวลาเริ่มต้นของการทดลอง ที่ขั้วแคโทดสามารถสังเกตเห็นของแข็งสีขาวมีลักษณะเป็นเยื่อบาง ๆ เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าขั้วอย่างสม่ำเสมอ และเกิดฟองแก๊สเพียงเล็กน้อยที่ขั้วแอโนดและแคโทด เมื่อเวลาผ่านไปขั้วแคโทดมีของแข็งขาวรวมตัวที่ผิวหน้าขั้วมากขึ้น และเกิดความปั่นป่วนของฟองแก๊สที่ผิวหน้าทั้งสองขั้วไฟฟ้า จากลักษณะที่เกิดขึ้นในการทดลองสามารถอธิบายด้วยผลของกระแสไฟฟ้า ความนำไฟฟ้า พีเอช และประสิทธิภาพเชิงกระแส ดังนี้

##### 4.1.3.1. ผลของกระแสไฟฟ้า

ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ สำหรับการจัดเรียงขั้วแบบเซลล์เดี่ยว และเซลล์ต่อขนาน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา  
เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา  
เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน

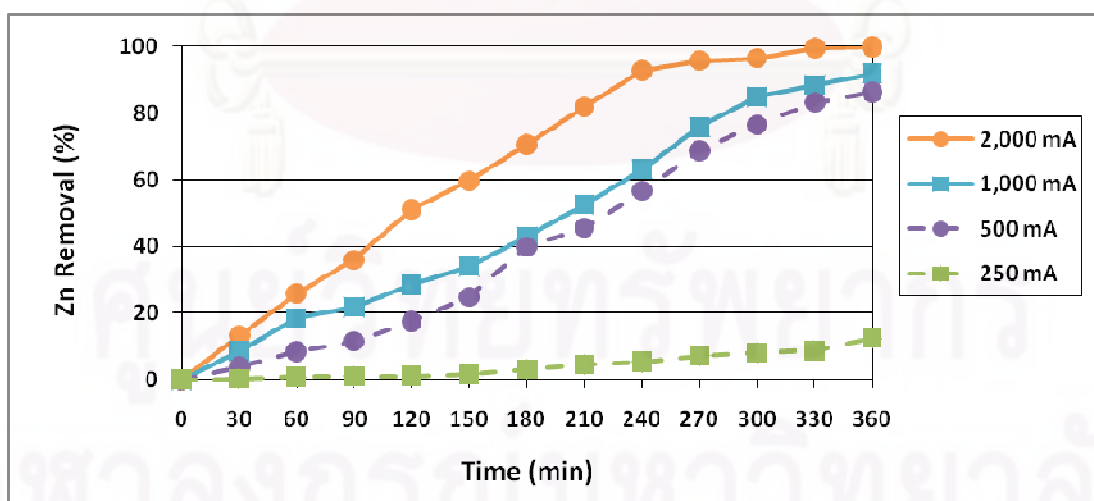
ในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อให้เวลาในการผ่านกระแสไฟฟ้านานขึ้น โดยอัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีจะมากขึ้นเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้มีความสูง (นั่นคือมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสังกะสีในสารละลายลดลงจนมีความเข้มข้นเข้าใกล้



ศูนย์ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 2,000 mA ในเซลล์เดี่ยว และที่ 500, 1,000 และ 2,000 mA ในเซลล์ต่อขนาน

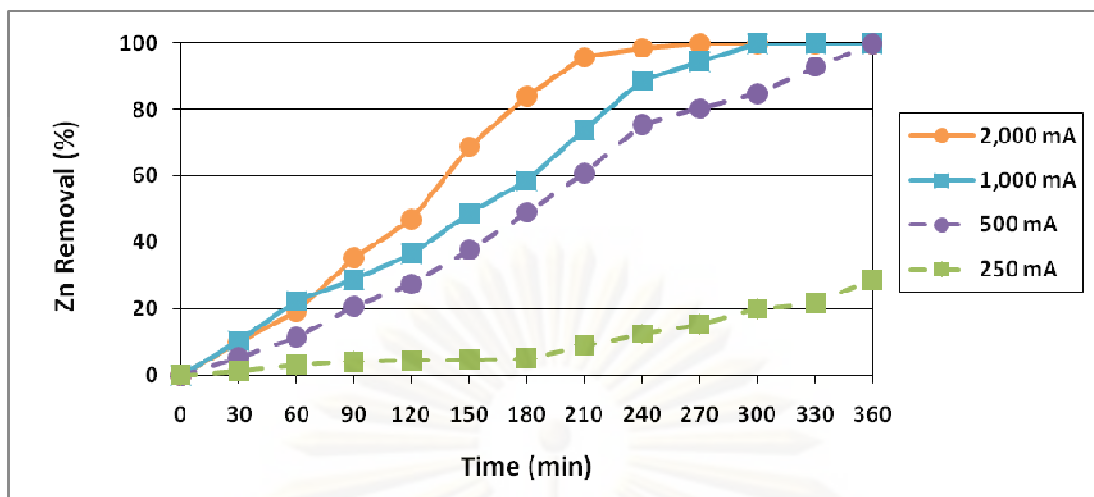
อัตราการลดลงของสังกะสีในทั้งสองการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า พบว่า อัตราการลดลงเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีในเซลล์เดี่ยวที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2,000, 1,000, 500 และ 250 มิลลิแอมแปร์ มีค่า 0.38, 0.18, 0.15 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรต่ออนาที ตามลำดับ ส่วนอัตราการลดลงเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีในเซลล์ต่อขนานที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2,000, 1,000, 500 และ 250 มิลลิแอมแปร์ มีค่า 0.43, 0.33, 0.27 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตรต่ออนาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบการจัดเรียงเซลล์ทั้ง 2 แบบ ณ ค่ากระแสไฟฟ้าควบคุมที่เท่ากัน พบว่า อัตราการลดลงเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีในเซลล์ต่อขนานมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในเซลล์เดี่ยว อันเป็นผลเนื่องมาจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สังกะสีที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุม โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่า 155 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ ของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว สามารถลดปริมาณสังกะสีในสารละลาย ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ 12%, 86%, 92% และ 100% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ส่วนการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบต่อขนาน พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 2,000, 1,000 และ 500 มิลลิแอมแปร์ สามารถกำจัดสังกะสีให้ลดลงได้ถึง 100% ณ ชั่วโมงที่ 4.5, 5 และ 6 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา

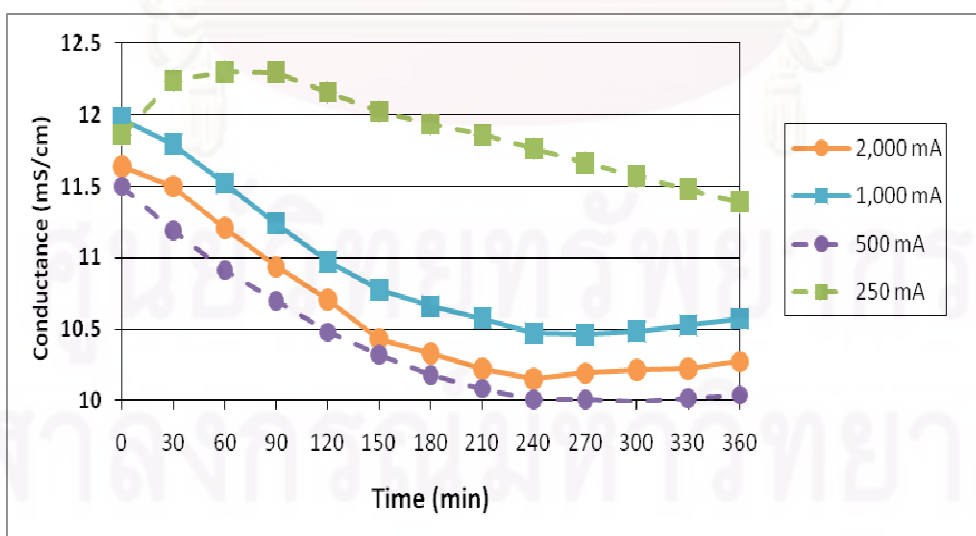
เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว



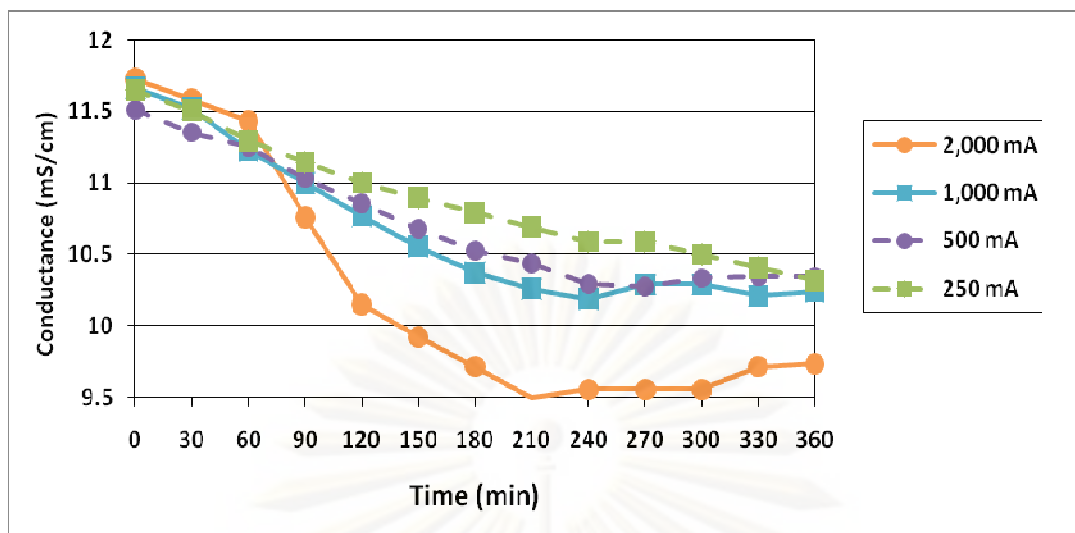
รูปที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา  
เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน

#### 4.1.3.2 ความนำไฟฟ้า

ความนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีค่า 12 มิลลิซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการทดลองโดยการให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร (155 มิลลิกรัมต่อลิตร) และทำการวัดความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ในทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 สำหรับแบบเซลล์เดี่ยว และเซลล์ต่อขนาน ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความนำไฟฟ้าเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว



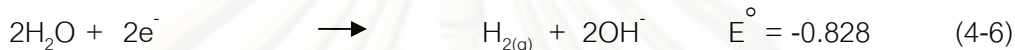
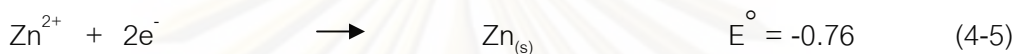
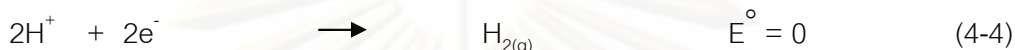
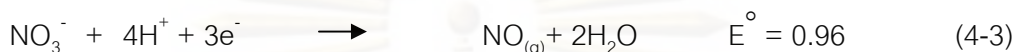
รูปที่ 4.8 ความนำไฟฟ้าเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน

จากผลการทดลอง พบว่า ความนำไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายในเซลล์ทั้งสองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน นั่นคือ ที่ค่ากระแสควบคุม 250 mA ความนำไฟฟ้าที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่ใช้ในการทดลอง และที่ค่ากระแสควบคุม 500, 1,000 และ 2,000 mA ความนำไฟฟ้าของสารละลายมีค่าลดลงตามเวลาที่ใช้ในการผ่านกระแสไฟฟ้าในช่วงต้น จากนั้นค่าการนำไฟฟ้ามักคงที่และ/หรือปรับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงปลาย (หลังจาก 240 นาที ในเซลล์เดี่ยว และประมาณ 210 นาที ในเซลล์ต่อขนาน) โดย ณ ชั่วโมงที่ 6 พบว่า ความนำไฟฟ้าของสารละลายในเซลล์เดี่ยวลดลงเหลือ 11.39, 10.04, 10.57 และ 10.27 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ณ ค่ากระแสไฟฟ้าควบคุมที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละของการลดลงได้ 4%, 13%, 12% และ 12% ตามลำดับ ส่วนการจัดเรียงขั้วแบบต่อขนาน พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ สามารถลดค่าการนำไฟฟ้า ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้เหลือ 10.32, 10.34, 10.24 และ 9.73 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละของการลดลงได้ 11%, 10%, 12% และ 17% ตามลำดับ

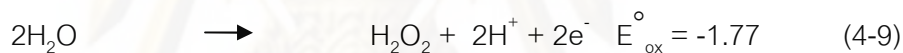
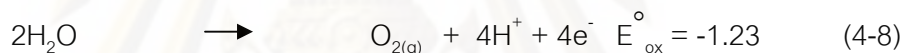
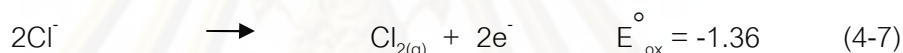
การที่ปริมาณไอออนของสังกะสีและไอออนอื่น ๆ ที่มีอยู่ในสารละลายมีค่าลดลงจะมีผลทำให้เกิดการลดลงของความนำไฟฟ้า (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2545) ดังนั้นการลดลงของความนำไฟฟ้าของสารละลายในช่วงต้นของการทดลอง สำหรับทุกๆ ค่ากระแสที่ควบคุม จึงสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณสังกะสีในสารละลาย ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.6 ทั้งนี้การลดลงของปริมาณสังกะสีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันบนขั้วแคโทด ดังแสดงในสมการที่ 4-5 ในขณะที่ทำการทดลองสังเกตเห็นสีขาวบางๆ เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าขั้วแคโทดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์สังกะสีของแข็งที่เกิดขึ้นในสมการที่ 4-5 และเมื่อเวลาผ่าน

ไปสังกะสีจะรวมตัวที่ผิวขั้วมากขึ้น แต่ลักษณะการเข้าเกาะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอที่บริเวณผิวหน้าขั้ว เนื่องจากการรบกวนของฟองแก๊สที่มีปริมาณมากขึ้น เมื่อพิจารณาประกอบกับผลที่สังเกตได้ในขณะทำการทดลอง ทำให้เชื่อได้ว่ามีปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากไอออนชนิดอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในสารละลายเกิดร่วมขึ้นด้วยบนขั้วแคโทดและแอโนด ในขณะทำการควบคุมกระแสคงที่ ความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาเหล่านี้ได้ถูกนำเสนอไว้ในสมการที่ 4-3 ถึง 4-9

#### ปฏิกิริยาบนขั้วแคโทด



#### ปฏิกิริยาบนขั้วแอโนด



ในช่วงต้นของการทดลองแบบควบคุมค่ากระแสคงที่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วแคโทด ได้แก่ ปฏิกิริยาที่ 4-3 ถึง 4-5 เนื่องจากในช่วงเวลานี้  $\text{Zn}^{2+}$  และ  $\text{NO}_3^-$  ไอออนในสารละลายมีปริมาณมาก อีกทั้งค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในการเกิดรีดักชันของไอออนทั้งสองมีค่าสูง ทำให้ปฏิกิริยาที่ 4-3 และ 4-5 สามารถดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว และเนื่องจากสารละลายในเบื้องต้นมีค่าพีเอชค่อนข้างต่ำ ทำให้มีปริมาณ  $\text{H}^+$  ในสารละลายอยู่มาก ดังนั้นปฏิกิริยาที่ 4-4 จึงเกิดขึ้นได้ดี ในฝั่งของขั้วแอโนด  $\text{Cl}^-$  สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายที่สุด โดยสังเกตจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน และด้วยปริมาณที่มีอยู่มากของ  $\text{Cl}^-$  ในสารละลาย ปฏิกิริยาที่ 4-7 จึงเป็นเพียงปฏิกิริยาเดียวที่ดำเนินไปบนขั้วแอโนดในช่วงต้นของการทดลองนี้ ซึ่งผลของการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่นำเสนอทั้งสี่นี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ว่า ความนำไฟฟ้าของสารละลายลดลงในช่วงต้น อันเนื่องมาจากการลดลงของปริมาณไอออนในสารละลาย

ในช่วงปลายของการทดลอง (หลังจาก 240 นาที ในเซลล์เดี่ยว และประมาณ 210 นาที ในเซลล์ต่อขนาน) เมื่อ  $\text{Zn}^{2+}$  และ  $\text{NO}_3^-$  ไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย มีปริมาณลดลงอย่างมาก เป็นผลให้ปฏิกิริยารีดักชัน (หรือการรับอิเล็กตรอน) อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่ 4-3 และ 4-5 บนขั้วแคโทดเกิดขึ้นน้อย และเพื่อให้ปริมาณการไหลเวียนของอิเล็กตรอนคงเดิมดังที่



กำหนดไว้ด้วยค่ากระแสที่ถูกควบคุมไว้ให้คงที่ ตัวทำละลายอย่างน้ำจึงเข้ามาร่วมในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วย แม้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำจะมีค่าสูงก็ตาม ดังนั้นในช่วงปลายของการทดลองนี้ ปฏิกิริยารีดักชันหลักที่ดำเนินไปบนขั้วแคโทด คือ ปฏิกิริยาที่ 4-4 และ 4-6 และด้วยเหตุผลในลักษณะเดียวกัน เมื่อปริมาณ  $\text{Cl}^-$  ลดลง ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ ในสมการที่ 4-8 และ 4-9 จึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นในรูปของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่ 4-6, 4-8 และ 4-9 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของน้ำที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินสูง ประกอบกับปริมาณการลดลงของ  $\text{H}^+$  ในปฏิกิริยาที่ 2 ที่เกิดขึ้นได้ง่ายบนขั้วแคโทด เนื่องจากสารละลายยังมีความเป็นกรดอยู่มาก ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ไอออนที่เกิดขึ้นมีความสมดุลหรือมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณ  $\text{H}^+$  ที่ถูกใช้ปฏิกิริยาตั้งต้นในปฏิกิริยาที่ 4-4 จึงเป็นผลให้ความนำไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงปลายของการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4-7 และรูปที่ 4-8

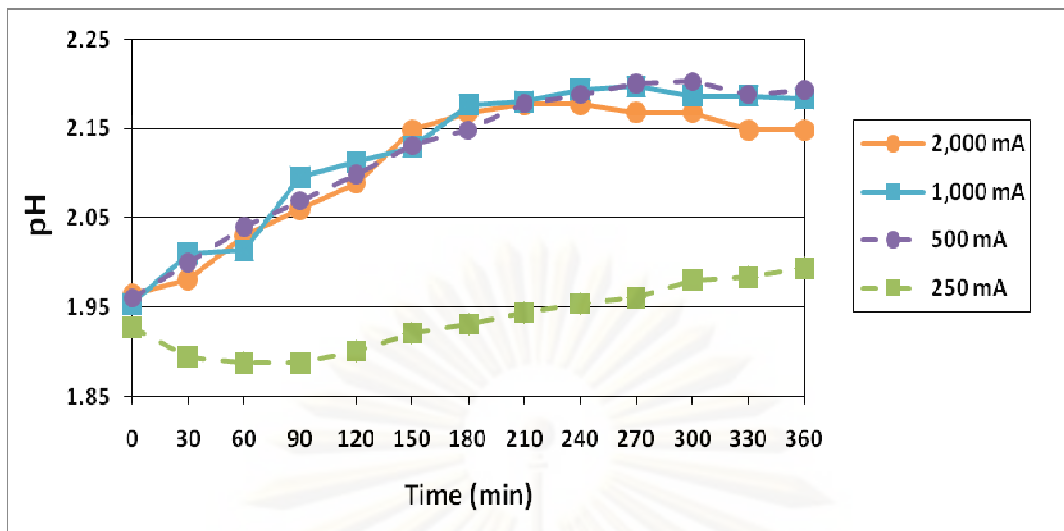
อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไม่สามารถลดความนำไฟฟ้าได้เกิน 20% นั้น เนื่องจากผลขององค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีอยู่ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับสังกะสี เช่น โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) คลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) และโปรตอน ( $\text{H}^+$ ) เป็นต้น

#### 4.1.3.3 พิเอซ

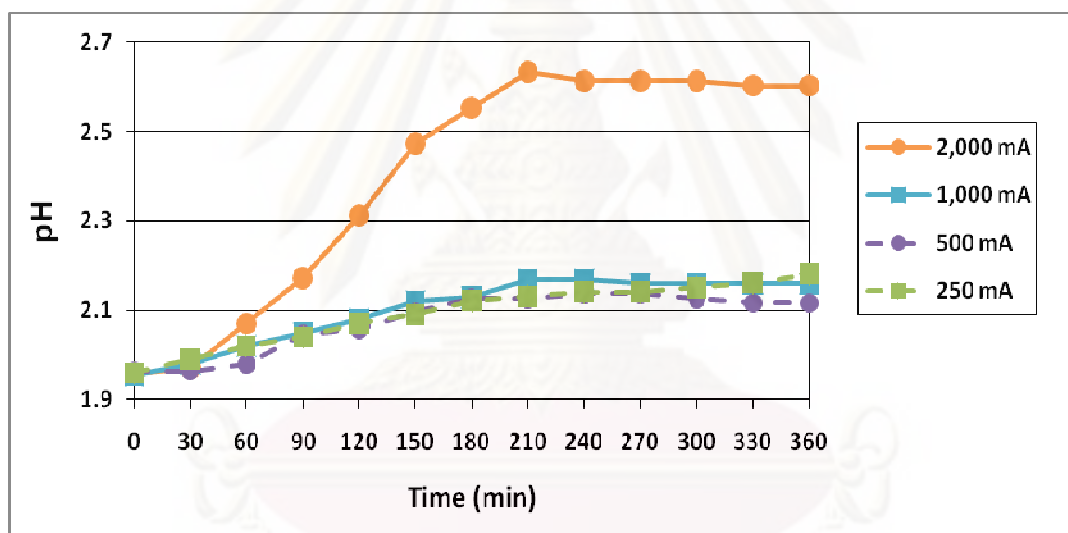
น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพิเอซเริ่มต้นที่ 1.95 ซึ่งได้จากการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ วัดการเปลี่ยนแปลงของค่าพิเอซจากน้ำเสียสังเคราะห์ในทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 สำหรับแบบเซลล์เดี่ยว และเซลล์ต่อขนานตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.9 พีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว



รูปที่ 4.10 พีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไมโนโพลาไรต์ต่อขนาน

จากผลการทดลอง พบว่า ในทุกๆ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุม ค่าพีเอชในทั้งสองเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดลองช่วงต้น และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงท้ายของการทดลอง ทั้งนี้ ณ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่า 1.99, 2.20, 2.20 และ 2.18 ณ เวลา 360, 300, 270 และ 240 นาที ตามลำดับ และในชั่วโมงที่ 6 พีเอชมีค่า 1.99, 2.19, 2.18 และ 2.15 เมื่อควบคุมค่ากระแสที่ 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ สำหรับการจัดเรียงขั้วแบบต่อขนาน พบว่า ณ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 250,

500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ ค่าพีเอชมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่า 2.18, 2.14, 2.17 และ 2.63 ณ เวลา 360, 270, 240 และ 210 นาที ตามลำดับ จากนั้นมีค่าคงที่ที่ 2.18, 2.12, 2.16 และ 2.60 ตามลำดับ ต่อเนื่องไปจนถึงชั่วโมงที่ 6

การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชอย่างต่อเนื่องที่พบในช่วงต้นของการทดลอง เป็นผลมาจากการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ 4-3 และ 4-4 บนขั้วแคโทด ซึ่งโปรตอน ( $H^+$ ) ถูกใช้เป็นตัวตั้งต้นในการดำเนินปฏิกิริยา จึงมีผลให้ความเข้มข้นของ  $H^+$  ลดลง ดังนั้นค่าพีเอชที่วัดได้จึงมีค่ามากขึ้น

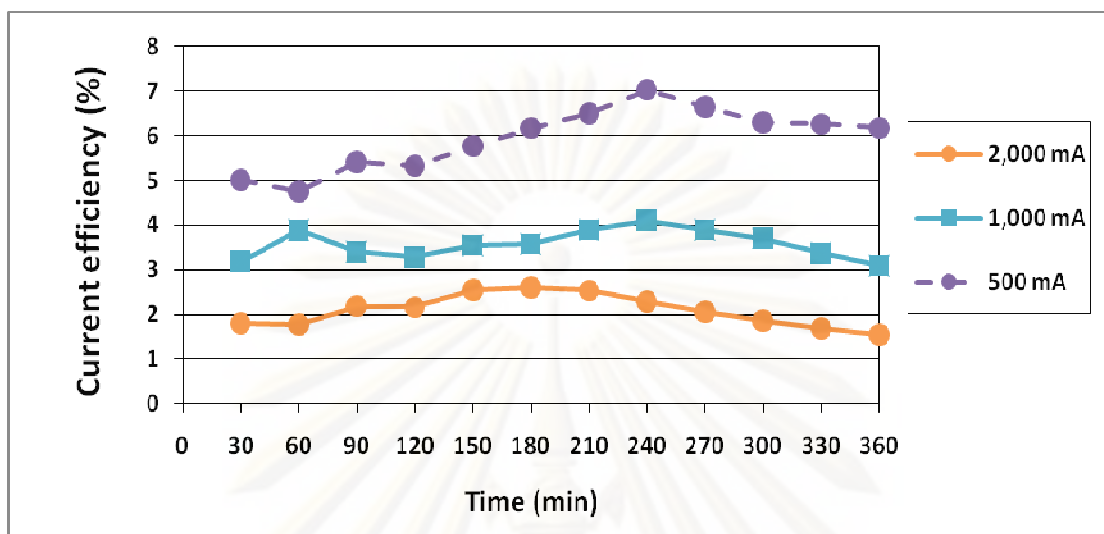
ผลการทดลองในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ในทุกๆ ค่าของกระแสที่ควบคุม ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง และคงที่ต่อเนื่องไปจนจบการทดลอง ณ ชั่วโมงที่ 6 ผลการทดลองในช่วงปลายนี้สอดคล้องกับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ นั่นคือ เมื่อปริมาณของ  $Zn^{2+}$  และ  $NO_3^-$  ลดลงหรือหมดไป จะเหลือเพียงปฏิกิริยาที่ 4-4 และ 4-6 เท่านั้น ที่เป็นปฏิกิริยาหลักและดำเนินไปบนขั้วแคโทด ในขณะที่ปฏิกิริยาที่ 4-7 ถึง 4-9 ดำเนินไปบนขั้วแอโนด จากการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการดำเนินไปของปฏิกิริยารวมถึงอัตราการเกิดและปริมาณของ  $H^+$  และ  $OH^-$  ที่เกิดขึ้น และใช้ไปในปฏิกิริยาเหล่านี้ จึงมีความเป็นไปได้ว่า  $H^+$  และ  $OH^-$  ที่เกิดขึ้นมีปริมาณสมดุลกันในช่วงปลายของการทดลองนี้ จึงเป็นผลทำให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วงเวลาดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณ  $H^+$  โดยรวมในสารละลายยังคงมีค่ามากจึงทำให้สารละลายยังมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงความเป็นกรด

#### 4.1.3.4 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

จากที่กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น พบว่าในขณะที่ทำการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ณ เวลาต่าง ๆ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วแคโทดมีมากกว่าหนึ่งปฏิกิริยาขึ้นไป ดังนั้น ปริมาณกระแสที่ให้แก่ระบบจึงไม่ถูกใช้ในการกำจัดสังกะสีเพียงอย่างเดียว การคำนวณประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency) จะสามารถระบุได้ว่า ณ ค่ากระแสใดมีผลรวมนจากปฏิกิริยาข้างเคียงมากที่สุด และค่ากระแสควบคุมใดเหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสังกะสี

จากผลการทดลอง ณ ค่ากระแสไฟฟ้าควบคุมที่เท่ากัน การจัดเรียงขั้วแบบต่อขนานมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีที่ดีกว่าการจัดเรียงขั้วแบบเซลล์เดี่ยว ดังนั้น การพิจารณาเลือกค่ากระแสที่เหมาะสมของการจัดเรียงขั้วแบบต่อขนาน จึงสามารถพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของแต่ละค่ากระแสไฟฟ้าควบคุมได้ โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่เลือกนำมา

พิจารณา คือ 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ เนื่องจากให้ค่าร้อยละการกำจัดสั๊งกะสีได้ 100% ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ โมโนโพลาร์ต่อขนาน

จากผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของ 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ คือ 6.87%, 4.20% และ 2.60% ณ เวลาที่ 240, 240 และ 180 นาที ตามลำดับ ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ 500 มิลลิแอมแปร์ จึงมีความเหมาะสมในการกำจัดสั๊งกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์มากที่สุดในชุดการทดลองนี้ เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าค่าอื่น ๆ นอกจากนี้ ยังพบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากผ่านค่าสูงสุดมาแล้ว ซึ่งเป็นผลสอดคล้องกับปริมาณสั๊งกะสีที่เหลืออยู่น้อยในสารละลาย ณ เวลาดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทำให้ปริมาณกระแสคงที่ที่ให้ไปในระบบ ถูกใช้ไปกับการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่อเวลาดำเนินผ่านไป

คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ, 2545 ได้ทำการศึกษาการแยกสั๊งกะสีจากสารละลายด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสั๊งกะสี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า และใช้รูปแบบการจัดเรียงขั้วแบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 8,000 มิลลิแอมแปร์

## 4.2 การทดลองส่วนที่ 2

น้ำเสียจริงเก็บมาจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตเส้นใย ที่จัดได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตหลักของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยน้ำเสียที่เก็บมามีลักษณะสีเหลืองขุ่น ซึ่งประกอบด้วยโลหะหนักที่สำคัญ คือ สังกะสี

จากการทำการวิเคราะห์หาสมบัติน้ำเสียจริงเพื่อใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

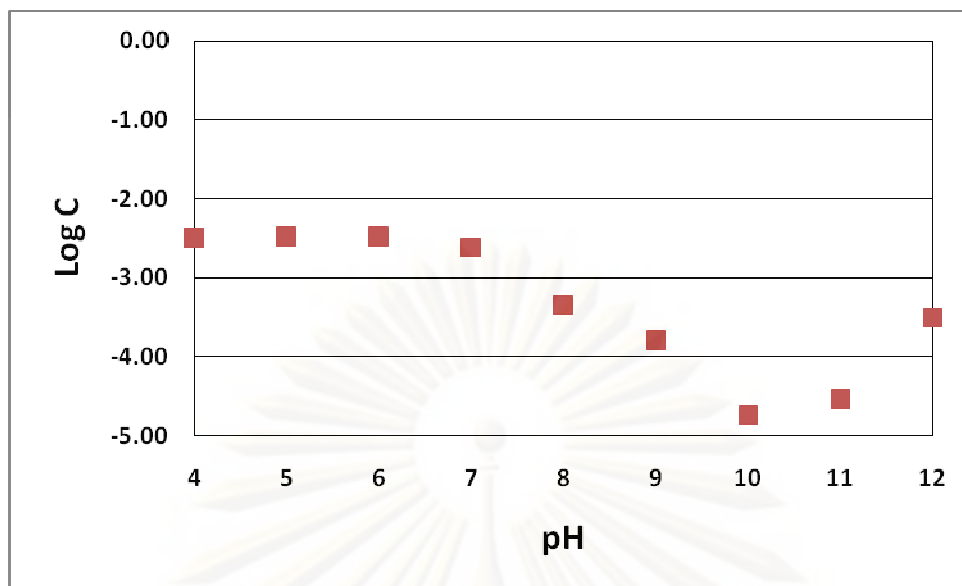
ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น
pH		1.7
Nitrate	mg/l	27
Sulfate	mg/l	11,800
Solid, Suspended	mg/l	100
COD, Total	mg/l	3,200
Solid, Dissolved	mg/l	23,600
Zinc, Total	mg/l Zn	200

### 4.2.1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ในการทดลองนี้จะทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียจริง ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 3.0 มิลลิโมลต่อลิตร (200 มิลลิกรัมต่อลิตร) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นจะทำการตรวจวัดหาความเข้มข้นของสังกะสีหลังการทดลอง ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

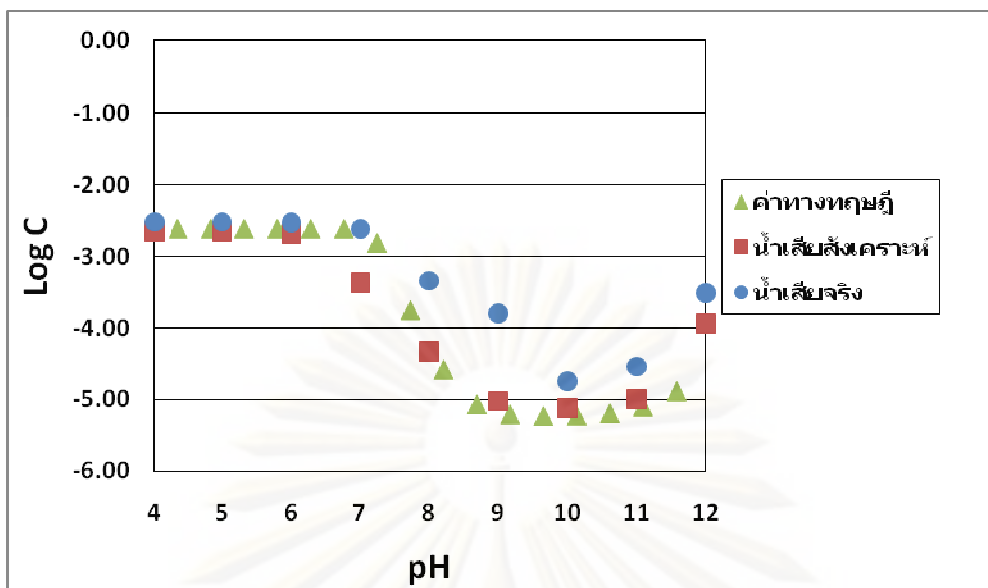


รูปที่ 4.12 ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ที่พีเอช 10 จัดเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริง โดยมี Log ความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย -4.74 หรือคิดเป็น 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.4% ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งก็คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียจริง และค่าทางทฤษฎี พบว่า มีแนวโน้มของปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายในแต่ละค่าพีเอชที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แต่ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์และค่าทางทฤษฎีมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียจริงในค่าพีเอชที่เท่ากัน เนื่องจาก ผลกระทบขององค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน

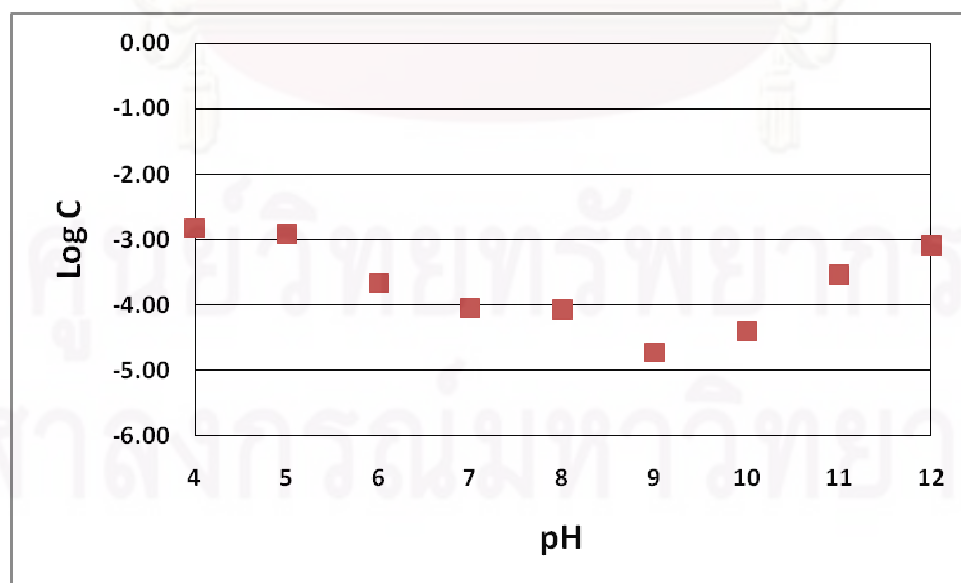




รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนสังกะสี  
จากน้ำเสียสังเคราะห์กับน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

#### 4.2.2 การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์

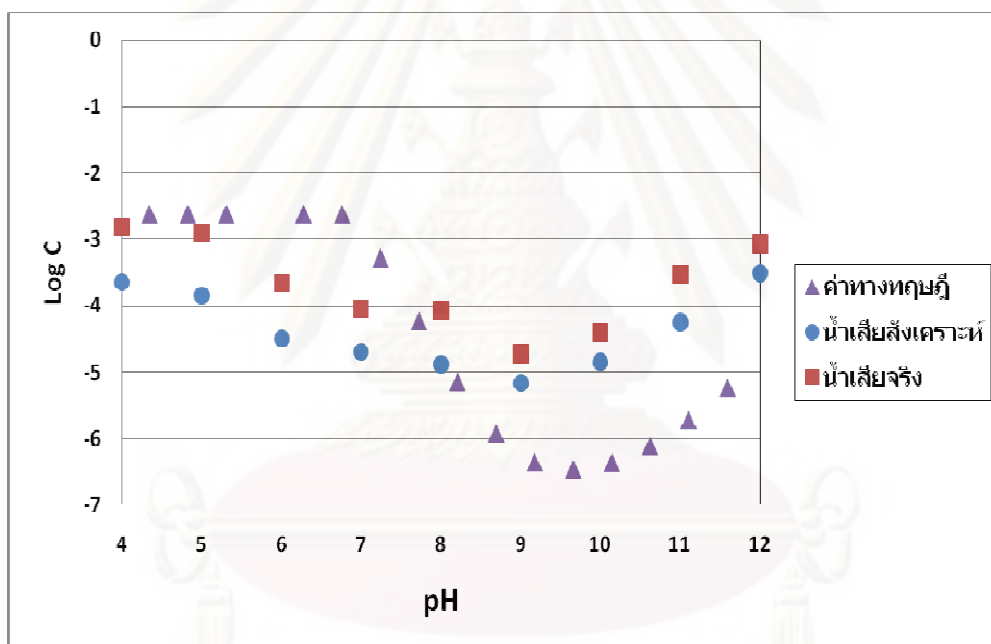
ในการทดลองนี้จะทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียจริง ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 3.0 มิลลิโมลต่อลิตร (200 มิลลิกรัมต่อลิตร) ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ จากนั้นจะทำการตรวจวัดหาความเข้มข้นของสังกะสีหลังการทดลอง ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ที่พีเอช 9 จัดเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริง โดยมี Log ความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย -4.74 หรือคิดเป็น 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.4% ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งก็คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียจริง และค่าทางทฤษฎี พบว่า มีแนวโน้มของปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายในแต่ละค่าพีเอชที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แต่ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์และค่าทางทฤษฎี มีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียจริงในค่าพีเอชที่เท่ากัน เนื่องจาก ผลกระทบขององค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน

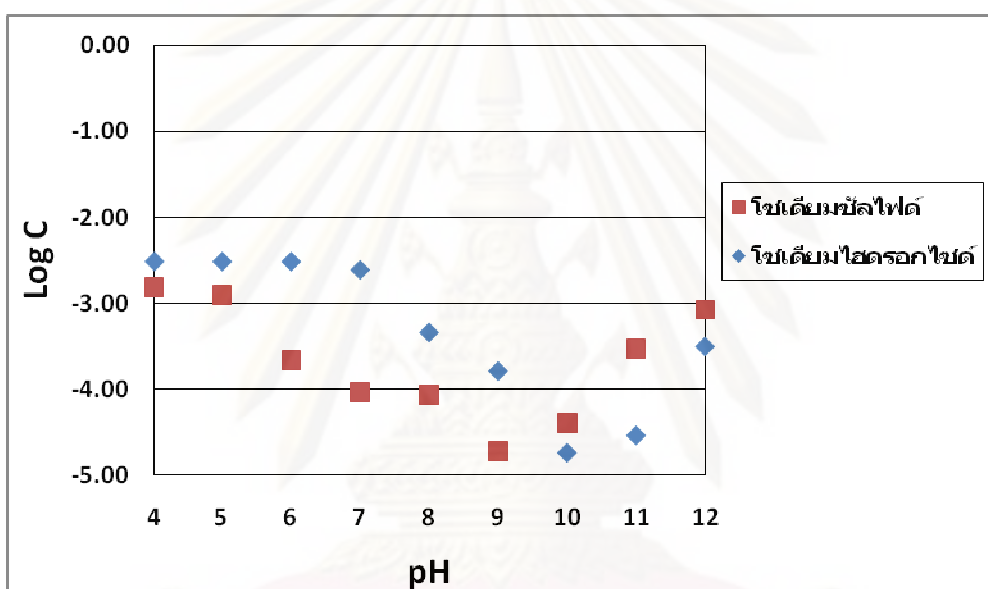


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และค่าทางทฤษฎีกับน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมซัลไฟด์

#### 4.2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

จากกราฟแสดงความสามารถในการละลายของสังกะสีที่พีเอชต่างๆ เมื่อตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ ในการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

โดยส่วนใหญ่จะมีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายสูงกว่าการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ในค่าพีเอชเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 นั้นแสดงถึงว่า การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีที่ดีกว่า แต่เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีและค่าใช้จ่ายที่ใช้ พบว่า การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอช 10 สามารถกำจัดสังกะได้ 99.4% และเสียค่าใช้จ่าย 110.40 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่พีเอช 9 สามารถกำจัดสังกะได้ 99.4% แต่ถ้าหากมีการจัดการที่ไม่ดีพอแล้วนั้น จะมีโอกาสเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ได้ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเสียค่าใช้จ่าย 141.16 บาทต่อลูกบาศก์เมตร



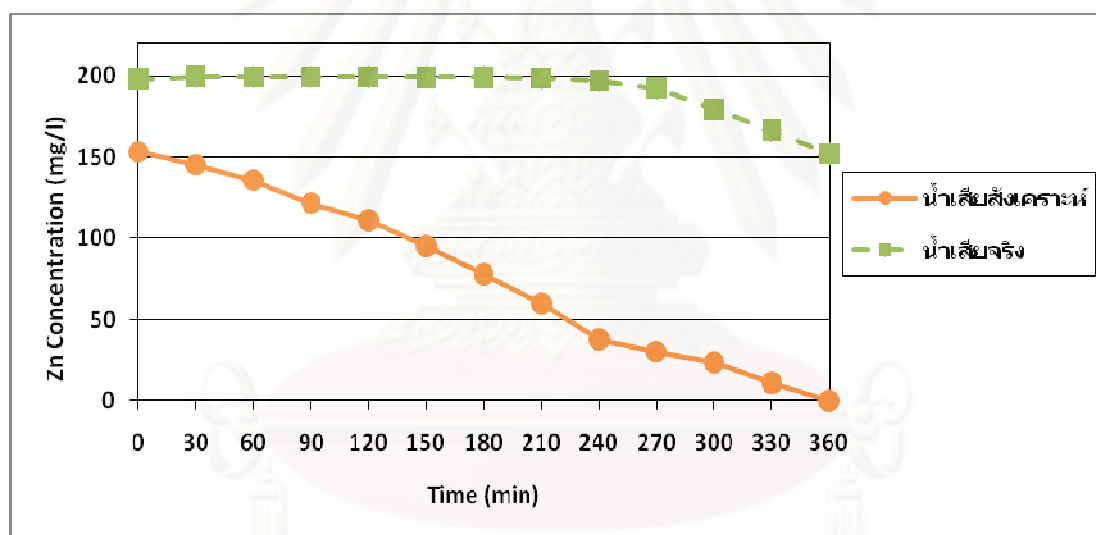
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์

สรุป การตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริง ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเหมาะสมกว่า เนื่องจาก ราคาสารเคมีที่ใช้ถูกกว่า และมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไม่แตกต่างกับการใช้โซเดียมซัลไฟด์ และยังไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากเท่ากับการใช้โซเดียมซัลไฟด์ แต่ถ้าหากคำนึงถึงค่าใช้จ่ายจากการรีดตะกอน การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีราคาที่สูงกว่า เนื่องจากมีความสามารถในการรีดน้ำออกจากตะกอนได้ยากกว่าตะกอนซัลไฟด์ (Freeman, 1989)

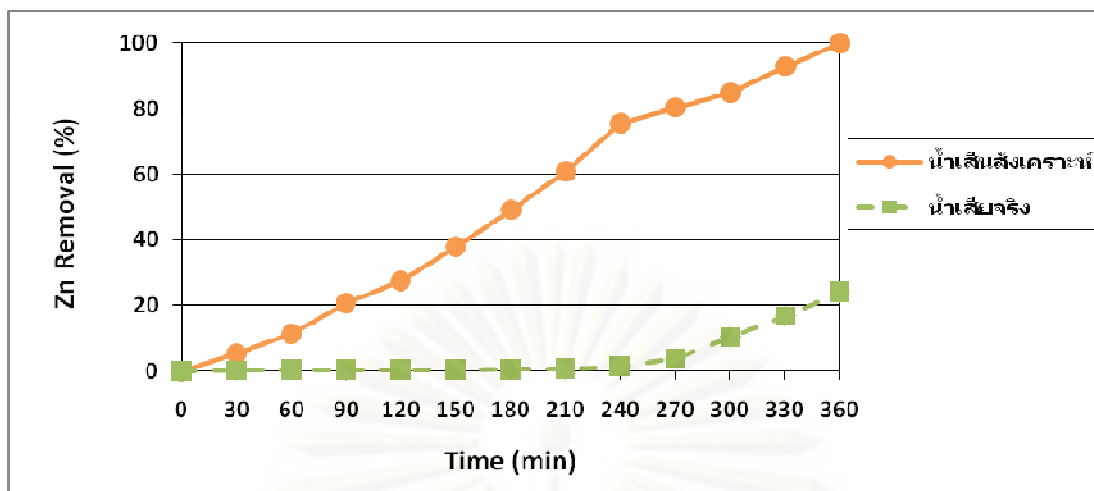
#### 4.2.4 การกำจัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ ดังผลการทดลองในส่วนที่ 1 ของวิธีการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า คือ การจัดเรียงขั้วแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน และมีค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ 500 มิลลิแอมแปร์ โดยคิดเป็นความหนาแน่นกระแส 27.78 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย 12.41 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ชนิดขั้วเป็นแกรไฟต์ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดขนาด 3 x 10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 ขั้ว วางห่างกันเป็นระยะ 1.5 เซนติเมตร

ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริง ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 500 มิลลิแอมแปร์ โดยการจัดเรียงขั้วแบบต่อขนาน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ



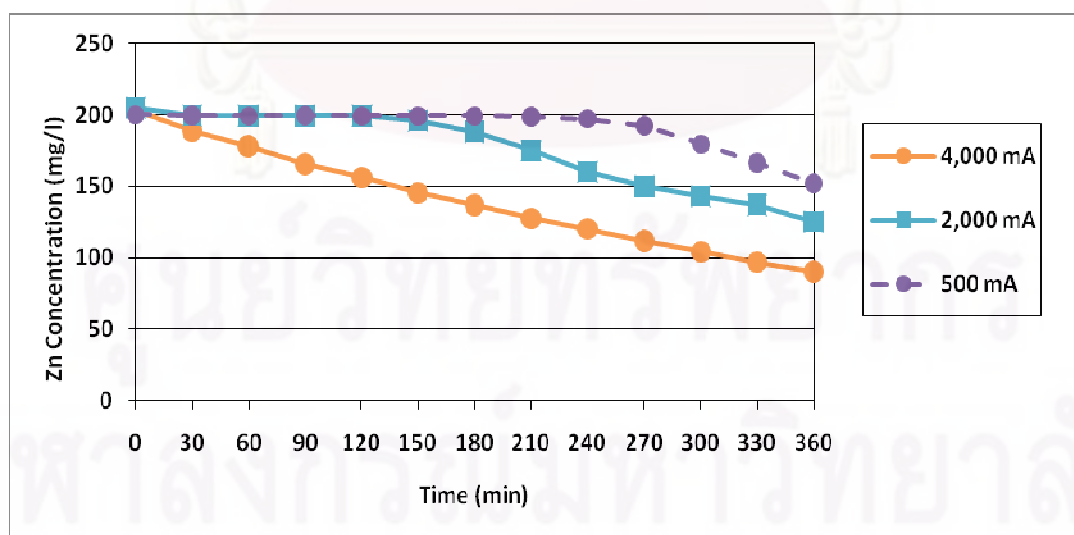
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสังกะสีกับเวลา  
เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสังกะสีกับเวลา เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

จากผลการทดลอง พบว่า สามารถกำจัดสังกะสี ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ลดลงเหลือ 152 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดเพียง 24% ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับในน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการทดลองของกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและ/หรือเวลาจะมีผลต่อการกำจัดสังกะสี ดังนั้นจึงทดสอบโดยการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 2,000 และ 4,000 มิลลิแอมแปร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดสังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบผลของกระแสต่อความเข้มข้นของสังกะสี  
เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์

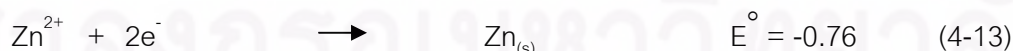
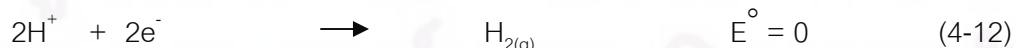
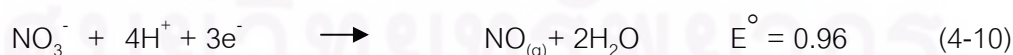


จากผลการทดลอง พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 2,000 และ 4,000 มิลลิแอมแปร์ สามารถลดปริมาณสังกะสีในสารละลาย ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ลดลงเหลือ 125 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัด 39% และ 56% ตามลำดับ ซึ่งถึงแม้ว่าการเพิ่มกระแสจะส่งผลทำให้ร้อยละในการกำจัดสังกะสีสูงขึ้น แต่ยังไม่สามารถกำจัดสังกะสีให้ลดลงได้จนเกือบหมดอย่างในกรณีของการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนั้นสาเหตุที่มีผลทำให้กระบวนการดังกล่าวนี้ไม่สามารถกำจัดสังกะสีได้ คือ องค์ประกอบที่แตกต่างกันระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	น้ำเสียจริง	น้ำเสียสังเคราะห์
pH	1.7	2
Zinc, Total (mg/l)	200	155
Nitrate (mg/l)	27	300
Sulfate (mg/l)	11,800	-
Solid, Suspended (mg/l)	100	-
COD (mg/l)	3,200	-

จากตารางที่ 4.2 องค์ประกอบที่แตกต่างระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ไอออนซัลเฟต สารอินทรีย์ และความขุ่นเนื่องจากสารแขวนลอย เป็นต้น โดยที่ฝั่งขั้วแคโทด องค์ประกอบที่มีความสามารถรับอิเล็กตรอนได้ก็คือ โปรตรอน สังกะสี ไอออน ไนเตรต และซัลเฟต ซึ่งมีสมการแสดงครึ่งปฏิกิริยารับอิเล็กตรอน ดังนี้



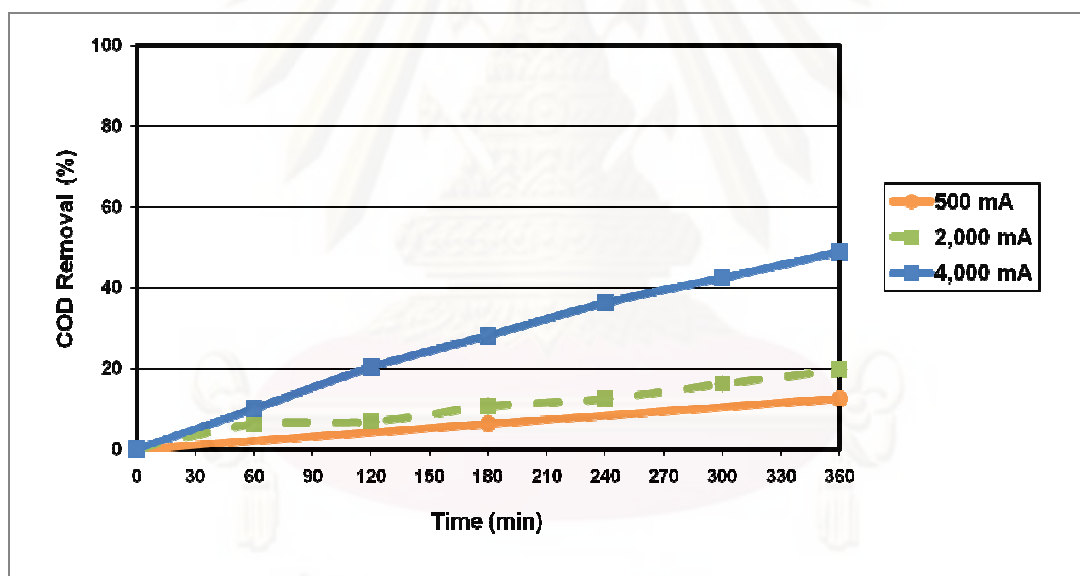
จากสมการถึงแม้ว่าไอออนไนเตรตจะมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าไอออนซัลเฟต แต่มีปริมาณแค่เพียง 27 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้อยกว่าสังกะสี แต่ไอออน

ซัลเฟตที่มีมากกว่าสังกะสีถึง 40 เท่า (เมื่อเทียบเป็นต่อโมล) และยังมีความสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า ดังนั้น สาเหตุหลักที่มีผลทำให้อัตราการลดลงของสังกะสีเกิดขึ้นได้ต่ำก็คือ ไฮดรอนซัลเฟต

ในส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจริง ซึ่งคาดว่าเป็นเซลลูโลส เนื่องจาก ในกระบวนการผลิตเส้นใย วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ เซลลูโลส ซึ่งมีสมการครึ่งปฏิกิริยาเคมี ดังนี้



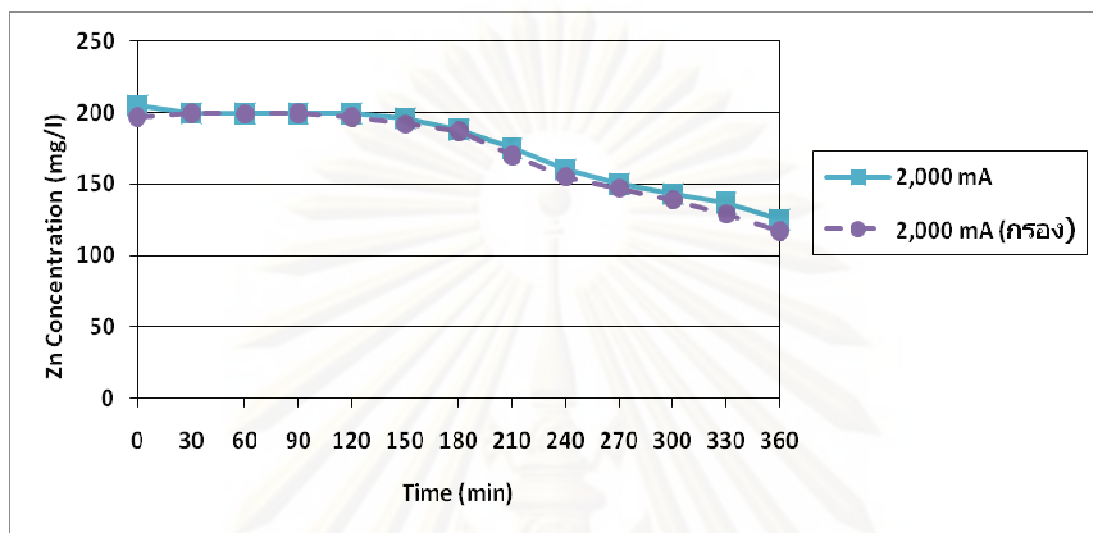
จากสมการ 4-14 ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เมื่อทำการทดสอบในค่ากระแสไฟฟ้าที่ 4,000, 2,000 และ 500 มิลลิแอมแปร์ พบว่า สามารถลดซีไอดีในน้ำเสียจริง ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ 48.81% ,19.69% และ15.63% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ดังนั้นจากผลการลดของซีไอดีที่ได้จากการทดลองจึงสอดคล้องกับปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น



รูปที่ 4.20 ผลของกระแสต่อความเข้มข้นของซีไอดี  
เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์

ในส่วนของสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำเสียจริง เมื่อนำมากรองเพื่อกำจัดสารแขวนลอยออกจากสารละลาย และนำมาทดสอบที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์ พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีให้ลดลงเหลือ 117 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัด 41% ณ ชั่วโมงที่ 6 ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเดิมที่ค่ากระแสเดียวกัน ณ ชั่วโมงที่ 6 สามารถลดสังกะสีลง

ได้ 39% ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งพบว่า ความขุ่นเนื่องจากสารแขวนลอยจะมีผลต่อความสามารถในการกำจัดสังกะสีแค่เพียง 2% ดังนั้นผลของสารแขวนลอยที่มีปริมาณอยู่เพียง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของสังกะสี



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบผลของสารแขวนลอยต่อความเข้มข้นของสังกะสี  
เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 2,000 มิลลิแอมแปร์

จากการทดลองที่ได้ของกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ทดสอบในน้ำเสียจริง สามารถลดปริมาณไอออน และสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของของแข็งละลายน้ำ โดย ณ ชั่วโมงที่ 6 ปริมาณของแข็งละลายน้ำที่ค่ากระแส 4,000, 2,000 และ 500 มิลลิแอมแปร์ สามารถลดความเข้มข้นลงได้ 49%, 35% และ 19% ตามลำดับ

สรุป สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี มีประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ไอออนซัลเฟต

ถึงแม้ว่ากระบวนการทางไฟฟ้าเคมีจะไม่สามารถกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงได้เทียบเท่ากับผลการทดลองด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี แต่กระบวนการดังกล่าวนี้สามารถลดปริมาณของสังกะสีไปพร้อมกับไอออนต่างๆ และสารอินทรีย์ที่มีผลทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียได้ โดยที่กระบวนการทางเคมีนั้นไม่สามารถลดค่าดังกล่าวนี้ได้หรือลดได้เพียงเล็กน้อย

### 4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการทดสอบกับน้ำเสียจริง โดยใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เพื่อศึกษาหาค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้ คำนวณค่าสารเคมีที่ต้องใช้ในการตกตะกอน และคำนวณค่าไฟฟ้าที่ต้องใช้ในวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก) โดยราคาที่คำนวณได้จะคิดเฉพาะค่าใช้จ่ายในระหว่างการทำดำเนินงานซึ่งไม่รวมค่าอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายจากการรื้อตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

#### 4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ในการทดสอบการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยได้ทำการทดลองด้วยสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ ค่าสารเคมีสำหรับการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่า 110.40 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสารเคมีสำหรับการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ มีค่า 141.16 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

#### 4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเคมี

ในการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายในการบำบัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จะคำนวณเฉพาะค่าไฟฟ้า โดยไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนที่ใช้ทั้งหมดในการบำบัด เพราะการทดลองนี้เป็นการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าใช้จ่ายที่ใช้เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า มีค่า 48.63 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

จากตารางที่ 4.3 แสดง การเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนทางเคมี และการทดลองทางไฟฟ้าเคมี พบว่า ในวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า 48.63 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ ประมาณ 61.77 และ 92.53 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดสังกะสียังไม่ดีพอเมื่อเทียบกับการตกตะกอนทางเคมี

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการตกตะกอนทางเคมี และการทดลองทางไฟฟ้าเคมี

	วิธีตกตะกอนเคมี		วิธีเคมีไฟฟ้า
	การตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์	การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์	เซลล์เดี่ยวต่อขนาน
1. ค่าสารเคมี	110.40	141.16	-
2. ค่าไฟฟ้า	-	-	48.63
รวม	110.40	141.16	48.63
% Zn removal (from industrial wastewater)	99.40	99.40	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี

1. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร (155 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ดีที่สุดที่พีเอช 10 โดยมีสังกะสีเหลืออยู่ในสารละลาย 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.68%
2. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร (155 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ดีที่สุดที่พีเอช 9 โดยมีสังกะสีเหลืออยู่ในสารละลาย 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.71%
3. การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร (155 มิลลิกรัมต่อลิตร) ความนำไฟฟ้า 12 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าพีเอช 1.96 พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ 100% ลดความนำไฟฟ้าได้ 10% และมีค่าพีเอช 2.1 ณ ชั่วโมงที่ 6 เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่ 500 มิลลิแอมแปร์ การจัดเรียงขั้วแบบโมโนโพลาร์ต่อขานานโดยมีขั้วแอโนดและแคโทดเป็นแกรไฟต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.5 เซนติเมตร และมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 27.78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
4. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียจริง ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 3 มิลลิโมลต่อลิตร (200 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ดีที่สุดที่พีเอช 10 โดยมีสังกะสีเหลืออยู่ในสารละลาย 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการ

กำจัด 99.4% โดยเสียค่าใช้จ่ายจากการปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 110.40 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

5. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำเสียจริง ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 3 มิลลิโมลต่อลิตร (200 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ดีที่สุดที่พีเอช 9 โดยมีสังกะสีเหลืออยู่ในสารละลาย 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัด 99.4% โดยเสียค่าใช้จ่ายจากการปรับพีเอชด้วยโซเดียมซัลไฟด์ 141.16 บาทต่อลูกบาศก์เมตร
6. การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 3 มิลลิโมลต่อลิตร (200 มิลลิกรัมต่อลิตร) ความนำไฟฟ้า 30 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าพีเอช 1.96 พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ 24% ความนำไฟฟ้ามีค่า 32 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าพีเอช 1.7 ณ ชั่วโมงที่ 6 เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่ 500 มิลลิแอมแปร์ การจัดเรียงขั้วแบบโมโนโพลาร์ต่อขนานโดยมีขั้วแอโนดและแคโทดเป็นแกรไฟต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.5 เซนติเมตร และมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 27.78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย 12.41 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
7. พลังงานที่ใช้ในการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริง ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ 19.45 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และค่าไฟฟ้าประมาณ 48.63 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าใช้จ่ายที่คิดไม่รวมค่าเครื่องมือ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลของไอออนไนเตรต ซัลเฟต และไอออนอื่นๆ ที่มีความสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสังกะสี ส่งผลทำให้ความสามารถในการกำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีลดลง
2. เสนอให้ศึกษาการกำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

3. เสนอให้ศึกษาการกำจัดซีโอดีพร้อมกับสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ในกรณีที่สารละลาย ไม่มีไอออนที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสังกะสี

### 5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

การขยายสเกล (Scale up) สิ่งที่ต้องต้องทราบ ก็คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดสารละลาย (Current density) และพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell volume ratio) โดยจะใช้ค่า Current density ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม และใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายให้มีค่าเท่ากัน (Cameselle และคณะ, 2005)

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2551. โครงการสร้างความเข้มแข็งในการเฝ้าระวังเพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหา  
มลพิษจากโรงงานในพื้นที่ที่มีความเปราะบางด้านสิ่งแวดล้อม. อ่างทอง. หน้า 82-120.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสนโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มีตนราการพิมพ์.
- คงศักดิ์ ดชติกุลสุวรรณ. 2545. การแยกสังกะสีจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีชนิดโซดาไนด์ด้วยวิธีการแยกด้วย  
ไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บริเมษ เจริญพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. 2539. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โคโรเนียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิค  
เคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันทุลเวศน์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงาน  
ประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศรายุทธ ลาภพูนผล. 2549. การกำจัดโครเมียมโดนกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- อภิรดี สุนทรภา. 2549. การนำกลับดีบุกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Benjamin, M.M. 2002. Water chemistry. Singapore: McGraw Hill Book.
- Cameselle, C., Pazos, M. and Sanroman, M.A. 2005. Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimization and scale-up. Chemosphere 60: 1080-1086.
- Carlos, I. A., Bidoia, E.D., Pallone, E. M. J. A., Almeida, M. R. H. and Souza, C. A.C. 2002. Effect of tartrate content on aging and deposition condition of copper-tin electrodeposits from a non-cyanide acid bath. Surface and Coatings Technology. 157: 14-18.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-44.
- Emamjomeh, M.M. and Sivakumar, M. 2008. Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. Journal of environmental management. 90: 1204-1212.
- Fourcade, F. and Tzedakis, T. 2000. Study of the mechanism of the electrochemical deposition of silver from an aqueous silver iodide suspension. Journal of Electroanalytical Chemistry. 493: 20-27.
- Freeman, H.M. 1989. Handbook of hazardous waste treatment and disposal. USA: McGraw Hill Book.
- Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York: MaGraw-Hill.
- Garcia-Gabaldon, M., Perez-Herranz, V., Garcia-Anton, J. and Guinon, J.L. 2005. Electrochemical recovery of tin and palladium from the activating solutions of the electroless plating of polymers Potentiostatic operation. Separation and Purification Technology. 45: 183-191.
- Manahan, J. 1993. Ion Exchange. Ann Arbor Science Publishers Department of Environmental Engineering. Illinois institute of technology. Chicago. 122 p.
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmes, M., Parga, J. and Cocke, D.L. 2004. Fundamentals present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. B114: 189-199.
- Patterson, J.W. 1985. Industrial wastewater treatment technology. Boston: Butterworth Publisher.
- Pertorius, W., Johannes, W. and Lempert, G. 1991. Electrolytic Iron flocculants production with bipolar electrode in series arrangement . Water SA. 17: 133-13.



Schlesinger, M. and Paunovic, M. 2000. Modern electroplating. New York: Wiley.

Scott, K., Chen, X., Atkinson, J.W., Todd, M. and Armstrong R.D. 1997. Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards. Conservation and Recycling. 20: 43-55.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

pH	Zinc concentration (mg/l)				Log C	% Removal	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
4	155.44	137.28	146.93	146.55	-2.65	5.41	9.09
5	149.37	145.23	144.23	146.28	-2.65	5.58	2.73
6	116.98	162.88	124.21	134.69	-2.69	13.06	24.68
7	27.34	29.42	28.01	28.26	-3.36	81.76	1.06
8	4.05	2.04	3.12	3.07	-4.33	98.02	1.01
9	0.64	0.46	0.77	0.62	-5.02	99.60	0.15
10	0.38	0.64	0.47	0.49	-5.12	99.68	0.13
11	0.90	0.57	0.49	0.65	-5.00	99.58	0.22
12	4.05	12.48	5.74	7.42	-3.94	95.21	4.46

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์

pH	Zinc concentration (mg/l)				Log C	% Removal	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
4	12.66	14.57	17.22	14.81	-3.64	90.44	2.29
5	8.10	10.80	9.39	9.43	-3.84	93.91	1.35
6	3.04	0.98	2.29	2.10	-4.49	98.64	1.04
7	1.17	1.37	1.42	1.32	-4.69	99.15	0.13
8	0.78	0.81	0.98	0.86	-4.88	99.45	0.11
9	0.51	0.40	0.42	0.44	-5.17	99.71	0.06
10	0.94	0.72	1.14	0.93	-4.85	99.40	0.21
11	3.90	3.88	3.24	3.67	-4.25	97.63	0.37
12	21.22	19.95	19.30	20.15	-3.51	87.15	0.98

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	155.00	155.00	155.00	155.00	0.00	
30	154.94	154.94	153.63	154.50	0.75	0.32
60	154.38	153.73	153.07	153.73	0.65	0.82
90	154.18	153.11	152.87	153.38	0.70	1.04
120	153.97	153.11	152.67	153.25	0.67	1.13
150	152.91	151.78	152.89	152.53	0.65	1.59
180	150.63	151.77	148.02	150.14	1.92	3.14
210	148.35	150.46	145.05	147.96	2.73	4.54
240	146.08	149.80	143.94	146.61	2.97	5.41
270	143.80	147.19	140.66	143.88	3.26	7.17
300	143.34	144.57	139.36	142.42	2.72	8.11
330	142.28	143.90	138.04	141.40	3.03	8.77
360	135.19	141.27	130.84	135.77	5.24	12.41

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	156.46	155.95	149.67	154.02	3.78	
30	149.87	146.58	148.23	148.23	1.65	3.76
60	148.86	137.22	136.50	140.86	6.94	8.55
90	142.53	129.87	136.20	136.20	6.33	11.57
120	136.20	122.53	122.83	127.19	7.81	17.42
150	125.06	106.33	115.70	115.70	9.37	24.88
180	99.24	90.13	88.15	92.50	5.92	39.94
210	93.67	73.92	83.80	83.80	9.87	45.59
240	77.97	57.72	64.31	66.67	10.33	56.72
270	56.20	44.30	43.72	48.07	7.05	68.79
300	41.52	30.89	36.20	36.20	5.32	76.50
330	31.39	24.56	21.44	25.80	5.09	83.25
360	23.80	18.23	21.01	21.01	2.78	86.36

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	155.00	155.00	155.00	155.00	0.00	0.00
30	143.69	138.47	142.65	141.60	2.77	8.64
60	132.39	116.05	130.87	126.44	9.03	18.43
90	122.83	119.56	121.06	121.15	1.64	21.84
120	113.27	106.74	112.62	110.88	3.60	28.47
150	103.72	100.12	102.73	102.19	1.86	34.07
180	90.16	86.89	88.34	88.46	1.64	42.93
210	75.75	70.10	74.60	73.48	2.99	52.59
240	57.35	56.69	57.19	57.08	0.34	63.18
270	37.43	38.09	37.26	37.60	0.43	75.75
300	22.48	25.75	22.25	23.49	1.96	84.84
330	17.52	18.50	17.47	17.83	0.58	88.50
360	12.43	13.41	12.24	12.69	0.63	91.81

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	155.00	157.34	155.00	155.78	1.35	0.00
30	136.62	132.95	135.45	135.01	1.87	13.34
60	118.23	111.82	116.48	115.51	3.31	25.85
90	100.53	100.01	98.81	99.78	0.88	35.95
120	82.83	62.06	83.76	76.21	12.27	51.08
150	64.78	58.97	64.98	62.91	3.41	59.62
180	46.73	44.27	46.85	45.95	1.46	70.50
210	29.38	26.11	29.32	28.27	1.87	81.85
240	12.04	9.42	11.91	11.12	1.47	92.86
270	6.71	6.54	6.60	6.62	0.09	95.75
300	1.39	1.20	13.93	5.50	7.29	96.47
330	0.70	0.35	0.68	0.57	0.20	99.63
360	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้ กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	155.00	153.69	155.00	154.56	0.75	0.00
30	152.90	152.90	152.38	152.72	0.30	1.19
60	150.80	147.53	150.40	149.58	1.78	3.23
90	149.73	146.54	148.43	148.23	1.60	4.10
120	148.67	146.54	148.02	147.74	1.09	4.41
150	147.96	146.54	147.31	147.27	0.71	4.72
180	147.26	146.36	146.60	146.74	0.46	5.06
210	142.30	137.75	141.91	140.65	2.52	9.00
240	137.35	131.10	137.35	135.26	3.60	12.49
270	133.45	125.69	133.45	130.87	4.48	15.33
300	129.56	124.86	116.48	123.63	6.62	20.01
330	123.19	117.12	123.19	121.16	3.50	21.61
360	116.81	108.37	105.05	110.08	6.07	28.78



ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้ กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	155.00	152.39	152.39	153.26	1.51	0.00
30	146.88	146.88	141.99	145.25	2.82	5.22
60	138.76	137.78	130.88	135.81	4.30	11.39
90	127.79	114.71	122.36	121.62	6.57	20.64
120	116.81	103.74	112.54	111.03	6.67	27.55
150	99.82	90.02	95.55	95.13	4.92	37.93
180	82.83	74.66	76.29	77.93	4.32	49.15
210	60.88	61.41	57.62	59.97	2.05	60.87
240	38.94	36.39	37.37	37.57	1.29	75.49
270	31.50	28.46	30.33	30.10	1.53	80.36
300	24.07	22.60	23.22	23.30	0.74	84.80
330	12.04	10.34	10.40	10.92	0.96	92.87
360	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้ กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	155.00	165.85	155.00	158.62	6.26	0.00
30	139.45	148.86	138.79	142.37	5.63	10.25
60	123.89	128.72	116.70	123.11	6.05	22.39
90	112.92	118.03	107.69	112.88	5.17	28.84
120	101.95	105.24	94.76	100.65	5.36	36.55
150	83.19	84.81	75.34	81.11	5.06	48.86
180	64.42	68.62	63.84	65.63	2.61	58.63
210	41.06	43.20	39.69	41.32	1.77	73.95
240	17.70	18.52	16.91	17.71	0.80	88.83
270	8.85	8.98	7.93	8.59	0.57	94.59
300	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00
330	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00
360	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	155.95	155.95	155.95	155.95	0.00	0.00
30	141.27	142.42	138.00	140.56	2.30	9.87
60	126.08	127.60	124.11	125.93	1.75	19.25
90	102.28	101.99	97.70	100.66	2.56	35.46
120	85.06	84.10	79.83	83.00	2.78	46.78
150	45.57	49.15	50.80	48.51	2.67	68.90
180	26.08	25.16	23.27	24.83	1.43	84.07
210	6.58	6.59	6.35	6.51	0.14	95.83
240	2.53	2.21	1.79	2.18	0.37	98.60
270	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00
300	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00
330	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00
360	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	100.00

ตารางที่ ก.11 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทื)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.74	12.10	11.74	11.86	2.10E-01
30	12.12	12.49	12.10	12.24	2.22E-01
60	12.18	12.56	12.16	12.30	2.23E-01
90	12.17	12.55	12.17	12.30	2.17E-01
120	12.05	12.42	12.00	12.16	2.31E-01
150	11.91	12.28	11.88	12.02	2.22E-01
180	11.82	12.19	11.80	11.94	2.17E-01
210	11.73	12.09	11.75	11.86	2.04E-01
240	11.64	12.00	11.65	11.76	2.05E-01
270	11.55	11.91	11.53	11.66	2.12E-01
300	11.46	11.81	11.43	11.57	2.14E-01
330	11.37	11.72	11.35	11.48	2.09E-01
360	11.28	11.63	11.26	11.39	2.07E-01

ตารางที่ ก.12 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทื)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.66	11.57	11.27	11.50	2.06E-01
30	11.31	11.30	10.97	11.19	1.96E-01
60	11.02	11.03	10.69	10.91	1.91E-01
90	10.80	10.82	10.48	10.70	1.87E-01
120	10.57	10.60	10.27	10.48	1.84E-01
150	10.36	10.49	10.11	10.32	1.92E-01
180	10.18	10.38	9.97	10.18	2.04E-01
210	10.07	10.30	9.88	10.08	2.11E-01
240	10.00	10.22	9.81	10.01	2.07E-01
270	10.00	10.22	9.81	10.01	2.07E-01
300	9.97	10.21	9.79	9.99	2.12E-01
330	10.02	10.22	9.82	10.02	2.02E-01
360	10.05	10.23	9.84	10.04	1.97E-01



ตารางที่ ก.13 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทีก)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.67	11.94	12.31	11.97	3.21E-01
30	11.48	11.77	12.13	11.79	3.28E-01
60	11.23	11.49	11.85	11.52	3.09E-01
90	10.97	11.20	11.55	11.24	2.90E-01
120	10.70	10.94	11.28	10.97	2.91E-01
150	10.49	10.75	11.08	10.77	2.97E-01
180	10.39	10.63	10.96	10.66	2.86E-01
210	10.30	10.55	10.88	10.58	2.89E-01
240	10.25	10.42	10.74	10.47	2.50E-01
270	10.24	10.41	10.73	10.46	2.50E-01
300	10.25	10.44	10.76	10.48	2.59E-01
330	10.26	10.50	10.82	10.53	2.83E-01
360	10.29	10.55	10.88	10.57	2.94E-01

ตารางที่ ก.14 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทีก)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.65	11.66	11.61	11.64	2.65E-02
30	11.44	11.56	11.50	11.50	5.78E-02
60	11.15	11.26	11.21	11.21	5.63E-02
90	10.88	10.99	10.93	10.93	5.49E-02
120	10.65	10.76	10.70	10.70	5.38E-02
150	10.38	10.48	10.43	10.43	5.24E-02
180	10.28	10.38	10.33	10.33	5.19E-02
210	10.17	10.27	10.22	10.22	5.14E-02
240	10.10	10.20	10.15	10.15	5.10E-02
270	10.14	10.24	10.19	10.19	5.12E-02
300	10.16	10.26	10.21	10.21	5.13E-02
330	10.17	10.27	10.22	10.22	5.14E-02
360	10.22	10.32	10.27	10.27	5.16E-02

ตารางที่ ก.15 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทีก)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.63	11.62	11.70	11.65	4.36E-02
30	11.42	11.56	11.54	11.51	7.60E-02
60	11.21	11.35	11.32	11.29	7.46E-02
90	11.06	11.20	11.17	11.14	7.36E-02
120	10.92	11.06	11.03	11.00	7.26E-02
150	10.82	10.95	10.92	10.90	7.19E-02
180	10.71	10.84	10.82	10.79	7.12E-02
210	10.61	10.74	10.72	10.69	7.06E-02
240	10.51	10.64	10.62	10.59	6.99E-02
270	10.51	10.64	10.62	10.59	6.99E-02
300	10.42	10.55	10.53	10.50	6.93E-02
330	10.33	10.46	10.43	10.41	6.87E-02
360	10.24	10.37	10.34	10.32	6.81E-02

ตารางที่ ก.16 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.50	11.50	11.53	11.51	1.73E-02
30	11.24	11.35	11.47	11.35	1.15E-01
60	11.14	11.25	11.37	11.25	1.14E-01
90	10.92	11.03	11.14	11.03	1.11E-01
120	10.75	10.86	10.97	10.86	1.10E-01
150	10.57	10.68	10.79	10.68	1.08E-01
180	10.42	10.53	10.63	10.53	1.06E-01
210	10.33	10.44	10.54	10.44	1.05E-01
240	10.19	10.29	10.40	10.29	1.04E-01
270	10.17	10.27	10.38	10.27	1.04E-01
300	10.23	10.33	10.44	10.33	1.04E-01
330	10.24	10.34	10.45	10.34	1.04E-01
360	10.24	10.34	10.45	10.34	1.04E-01

ตารางที่ ก.17 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.66	11.62	11.72	11.67	5.03E-02
30	11.31	11.60	11.66	11.52	1.87E-01
60	11.02	11.30	11.36	11.23	1.82E-01
90	10.80	11.07	11.13	11.00	1.79E-01
120	10.57	10.84	10.90	10.77	1.75E-01
150	10.36	10.63	10.68	10.56	1.71E-01
180	10.18	10.44	10.49	10.37	1.68E-01
210	10.07	10.33	10.38	10.26	1.67E-01
240	10.00	10.26	10.31	10.19	1.65E-01
270	10.10	10.36	10.41	10.29	1.67E-01
300	10.10	10.36	10.41	10.29	1.67E-01
330	10.02	10.28	10.33	10.21	1.66E-01
360	10.05	10.31	10.36	10.24	1.66E-01



ตารางที่ ก.18 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทื)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	11.81	11.70	11.67	11.73	7.37E-02
30	11.66	11.66	11.43	11.58	1.34E-01
60	11.51	11.51	11.28	11.43	1.33E-01
90	10.83	10.83	10.61	10.76	1.25E-01
120	10.22	10.22	10.02	10.15	1.18E-01
150	9.99	9.99	9.79	9.92	1.15E-01
180	9.78	9.78	9.58	9.71	1.13E-01
210	9.56	9.56	9.37	9.50	1.10E-01
240	9.62	9.62	9.43	9.56	1.11E-01
270	9.62	9.62	9.43	9.56	1.11E-01
300	9.62	9.62	9.43	9.56	1.11E-01
330	9.78	9.78	9.58	9.71	1.13E-01
360	9.80	9.80	9.60	9.73	1.13E-01

ตารางที่ ก.19 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.94	1.90	1.94	1.93	2.20E-02
30	1.91	1.87	1.90	1.89	1.94E-02
60	1.91	1.87	1.88	1.89	1.98E-02
90	1.91	1.87	1.88	1.89	1.98E-02
120	1.92	1.88	1.90	1.90	1.88E-02
150	1.94	1.90	1.92	1.92	1.90E-02
180	1.95	1.91	1.93	1.93	1.91E-02
210	1.96	1.92	1.95	1.94	1.99E-02
240	1.97	1.93	1.96	1.95	2.00E-02
270	1.98	1.94	1.96	1.96	1.94E-02
300	2.00	1.96	1.98	1.98	1.96E-02
330	2.00	1.96	1.99	1.98	2.04E-02
360	2.01	1.97	2.00	1.99	2.05E-02

ตารางที่ ก.20 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทีก)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.95	2.01	1.92	1.96	4.56E-02
30	1.99	2.05	1.96	2.00	4.61E-02
60	2.03	2.09	2.00	2.04	4.66E-02
90	2.06	2.12	2.03	2.07	4.70E-02
120	2.09	2.15	2.06	2.10	4.74E-02
150	2.13	2.18	2.09	2.13	4.35E-02
180	2.14	2.20	2.10	2.15	4.81E-02
210	2.18	2.22	2.13	2.18	4.30E-02
240	2.18	2.24	2.14	2.19	4.86E-02
270	2.21	2.24	2.16	2.20	4.05E-02
300	2.21	2.24	2.16	2.20	4.14E-02
330	2.19	2.23	2.14	2.19	4.32E-02
360	2.20	2.23	2.15	2.19	4.12E-02

ตารางที่ ก.21 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.94	1.96	1.96	1.95	1.15E-02
30	2.00	2.01	2.02	2.01	1.00E-02
60	2.01	2.01	2.02	2.01	5.77E-03
90	2.07	2.06	2.16	2.10	5.29E-02
120	2.09	2.07	2.18	2.11	5.69E-02
150	2.11	2.08	2.20	2.13	6.13E-02
180	2.16	2.12	2.25	2.18	6.66E-02
210	2.16	2.13	2.25	2.18	6.24E-02
240	2.17	2.15	2.26	2.19	5.88E-02
270	2.17	2.16	2.26	2.20	5.53E-02
300	2.16	2.15	2.25	2.19	5.51E-02
330	2.16	2.15	2.25	2.19	5.51E-02
360	2.16	2.14	2.25	2.18	5.86E-02

ตารางที่ ก.22 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดียว เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.96	1.96	1.97	1.96	5.77E-03
30	2.01	1.98	1.95	1.98	2.93E-02
60	2.06	2.03	2.00	2.03	3.00E-02
90	2.09	2.06	2.03	2.06	3.04E-02
120	2.12	2.09	2.06	2.09	3.09E-02
150	2.18	2.15	2.12	2.15	3.17E-02
180	2.20	2.17	2.14	2.17	3.20E-02
210	2.21	2.18	2.15	2.18	3.22E-02
240	2.21	2.18	2.15	2.18	3.22E-02
270	2.20	2.17	2.14	2.17	3.20E-02
300	2.20	2.17	2.14	2.17	3.20E-02
330	2.18	2.15	2.12	2.15	3.17E-02
360	2.18	2.15	2.12	2.15	3.17E-02



ตารางที่ ก.23 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 250 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.95	1.97	1.96	1.96	1.00E-02
30	1.98	1.99	2.00	1.99	1.00E-02
60	2.01	2.02	2.03	2.02	1.02E-02
90	2.03	2.04	2.05	2.04	1.03E-02
120	2.06	2.07	2.08	2.07	1.04E-02
150	2.08	2.09	2.10	2.09	1.05E-02
180	2.11	2.12	2.13	2.12	1.07E-02
210	2.12	2.13	2.14	2.13	1.07E-02
240	2.13	2.14	2.15	2.14	1.08E-02
270	2.13	2.14	2.15	2.14	1.08E-02
300	2.14	2.15	2.16	2.15	1.08E-02
330	2.15	2.16	2.17	2.16	1.09E-02
360	2.17	2.18	2.19	2.18	1.10E-02

ตารางที่ ก.24 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.97	1.97	1.95	1.96	1.15E-02
30	1.97	1.97	1.95	1.96	1.15E-02
60	2.00	1.98	1.96	1.98	2.00E-02
90	2.05	2.03	2.06	2.05	1.22E-02
120	2.06	2.04	2.07	2.06	1.23E-02
150	2.10	2.08	2.11	2.10	1.25E-02
180	2.13	2.11	2.14	2.13	1.27E-02
210	2.13	2.11	2.14	2.13	1.27E-02
240	2.14	2.12	2.15	2.14	1.28E-02
270	2.14	2.12	2.15	2.14	1.28E-02
300	2.13	2.11	2.14	2.13	1.27E-02
330	2.12	2.10	2.13	2.12	1.27E-02
360	2.12	2.10	2.13	2.12	1.27E-02

ตารางที่ ก.25 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาทีก)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.95	1.96	1.95	1.95	5.77E-03
30	1.99	1.98	1.97	1.98	9.95E-03
60	2.03	2.02	2.01	2.02	1.02E-02
90	2.06	2.05	2.04	2.05	1.03E-02
120	2.09	2.08	2.07	2.08	1.05E-02
150	2.13	2.12	2.11	2.12	1.07E-02
180	2.14	2.13	2.12	2.13	1.07E-02
210	2.18	2.17	2.16	2.17	1.09E-02
240	2.18	2.17	2.16	2.17	1.09E-02
270	2.17	2.16	2.15	2.16	1.09E-02
300	2.17	2.16	2.15	2.16	1.09E-02
330	2.17	2.16	2.15	2.16	1.09E-02
360	2.17	2.16	2.15	2.16	1.09E-02

ตารางที่ ก.26 ค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.95	1.95	1.97	1.96	1.15E-02
30	1.96	1.97	1.98	1.97	9.80E-03
60	2.06	2.07	2.08	2.07	1.03E-02
90	2.16	2.17	2.18	2.17	1.08E-02
120	2.30	2.31	2.32	2.31	1.15E-02
150	2.46	2.47	2.48	2.47	1.23E-02
180	2.54	2.55	2.57	2.55	1.27E-02
210	2.62	2.63	2.65	2.63	1.31E-02
240	2.60	2.61	2.63	2.61	1.30E-02
270	2.60	2.61	2.63	2.61	1.30E-02
300	2.60	2.61	2.63	2.61	1.30E-02
330	2.59	2.60	2.62	2.60	1.30E-02
360	2.59	2.60	2.62	2.60	1.30E-02

ตารางที่ ก.27 ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

pH	Zinc concentration (mg/l)				Log C	% Removal	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
4	196.85	196.85	199.45	197.72	-2.52	0.18	1.50
5	197.26	197.26	198.29	197.60	-2.52	0.24	0.59
6	197.26	196.85	196.85	196.98	-2.52	0.55	0.24
7	188.48	144.96	140.62	158.02	-2.62	20.22	26.47
8	37.90	29.31	21.69	29.63	-3.34	85.04	8.11
9	9.58	7.52	14.50	10.53	-3.79	94.68	3.58
10	1.04	1.58	0.94	1.18	-4.74	99.40	0.34
11	1.60	2.17	1.88	1.88	-4.54	99.05	0.29
12	19.02	20.38	21.56	20.32	-3.51	89.74	1.27



ตารางที่ ก.28 ผลเปรียบเทียบการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

pH	น้ำเสียสังเคราะห์		น้ำเสียจริง	
	Zinc concentration (mg/l)	% Removal	Zinc concentration (mg/l)	% Removal
4	146.55	5.41	197.72	0.18
5	146.28	5.58	197.60	0.24
6	134.69	13.06	196.98	0.55
7	28.26	81.76	158.02	20.22
8	3.07	98.02	29.63	85.04
9	0.62	99.60	10.53	94.68
10	0.49	99.68	1.18	99.40
11	0.65	99.58	1.88	99.05
12	7.42	95.21	20.32	89.74

ตารางที่ ก.29 ผลการทดลองการตกตะกอนสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยโซเดียมซัลไฟด์

pH	Zinc concentration (mg/l)				Log C	% Removal	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
4	100.97	112.54	87.04	100.18	-2.81	49.42	12.77
5	80.05	87.68	77.22	81.65	-2.90	58.78	5.41
6	19.18	12.64	10.68	14.16	-3.66	92.85	4.45
7	5.90	5.73	6.23	5.96	-4.04	96.99	0.25
8	5.90	5.52	5.41	5.61	-4.07	97.17	0.26
9	0.47	1.25	2.00	1.24	-4.72	99.38	0.77
10	1.98	3.94	1.98	2.63	-4.39	98.67	1.13
11	7.86	28.33	21.76	19.32	-3.53	90.25	10.45
12	59.03	55.78	49.90	54.90	-3.08	72.28	4.63

ตารางที่ ก.30 ผลเปรียบเทียบการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์

pH	น้ำเสียสังเคราะห์		น้ำเสียจริง	
	Zinc concentration (mg/l)	% Removal	Zinc concentration (mg/l)	% Removal
4	9.43	90.44	100.18	49.42
5	2.10	93.91	81.65	58.78
6	1.32	98.64	14.16	92.85
7	0.86	99.15	5.96	96.99
8	0.44	99.45	5.61	97.17
9	0.93	99.71	1.24	99.38
10	3.67	99.40	2.63	98.67
11	20.15	97.63	19.32	90.25
12	9.43	87.15	54.90	72.28

ตารางที่ ก.31 ผลเปรียบเทียบการการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ ในน้ำเสียจริง

pH	โซเดียมไฮดรอกไซด์		โซเดียมซัลไฟด์	
	Zinc concentration (mg/l)	% Removal	Zinc concentration (mg/l)	% Removal
4	197.72	0.18	100.18	49.42
5	197.60	0.24	81.65	58.78
6	196.98	0.55	14.16	92.85
7	158.02	20.22	5.96	96.99
8	29.63	85.04	5.61	97.17
9	10.53	94.68	1.24	99.38
10	1.18	99.40	2.63	98.67
11	1.88	99.05	19.32	90.25
12	20.32	89.74	54.90	72.28

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.32 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	200.07	200.04	200.07	200.06	0.02	0
30	198.00	197.00	203.43	199.48	3.46	0.29
60	197.75	196.75	203.17	199.22	3.45	0.42
90	197.79	196.79	203.21	199.26	3.45	0.40
120	197.75	196.75	203.17	199.22	3.45	0.42
150	197.70	196.70	203.12	199.17	3.45	0.45
180	197.64	196.64	203.05	199.11	3.45	0.48
210	197.64	195.64	202.54	198.61	3.55	0.73
240	197.63	192.63	200.98	197.08	4.20	1.49
270	191.00	190.00	196.22	192.41	3.34	3.83
300	179.56	175.56	182.89	179.34	3.67	10.36
330	165.32	164.32	169.76	166.47	2.90	16.79
360	158.44	142.44	154.95	151.94	8.41	24.05



ตารางที่ ก.33 ความนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้ กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	ความนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	30.70	29.70	30.50	30.30	5.29E-01
30	31.60	32.07	31.28	31.65	3.96E-01
60	31.70	32.17	31.38	31.75	3.97E-01
90	32.10	32.58	31.78	32.15	4.02E-01
120	32.10	32.58	31.78	32.15	4.02E-01
150	32.20	32.68	31.88	32.25	4.03E-01
180	32.20	32.68	31.88	32.25	4.03E-01
210	32.20	32.68	31.88	32.25	4.03E-01
240	32.30	32.78	31.98	32.35	4.05E-01
270	32.40	32.88	32.08	32.45	4.06E-01
300	32.50	32.98	32.18	32.55	4.07E-01
330	32.40	32.88	32.08	32.45	4.06E-01
360	32.30	32.78	31.98	32.35	4.05E-01

ตารางที่ ก.34 ค่าพีเอชที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	pH				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0	1.70	1.72	1.74	1.72	2.00E-02
30	1.71	1.72	1.73	1.72	8.64E-03
60	1.67	1.68	1.69	1.68	8.43E-03
90	1.61	1.62	1.63	1.62	8.13E-03
120	1.66	1.67	1.68	1.67	8.38E-03
150	1.68	1.69	1.70	1.69	8.48E-03
180	1.69	1.70	1.71	1.70	8.54E-03
210	1.67	1.68	1.69	1.68	8.43E-03
240	1.72	1.73	1.74	1.73	8.69E-03
270	1.70	1.71	1.72	1.71	8.59E-03
300	1.71	1.72	1.73	1.72	8.64E-03
330	1.73	1.74	1.75	1.74	8.74E-03
360	1.73	1.74	1.75	1.74	8.74E-03

ตารางที่ ก.35 ผลเปรียบเทียบการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

เวลา (นาท)	น้ำเสียสังเคราะห์		น้ำเสียจริง	
	Zn (mg/l)	% Removal	Zn (mg/l)	% Removal
0	153.26	0	200.06	0
30	145.25	5.22	199.48	0.29
60	135.81	11.39	199.22	0.42
90	121.62	20.64	199.26	0.40
120	111.03	27.55	199.22	0.42
150	95.13	37.93	199.17	0.45
180	77.93	49.15	199.11	0.48
210	59.97	60.87	198.61	0.73
240	37.57	75.49	197.08	1.49
270	30.10	80.36	192.41	3.83
300	23.30	84.80	179.34	10.36
330	10.92	92.87	166.47	16.79
360	N.D.	100.00	151.94	24.05



ภาคผนวก ข  
วิธีการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสี

การกำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้าเคมี มีค่าใช้จ่ายอยู่หลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า เป็นต้น แต่ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดนั้นได้ โดยเฉพาะค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า เครื่องกวน และขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ถ้าหากจะนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงแล้วนั้น ต้องมีการปรับปรุงขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

### ข.1.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ในการทดลองการตกตะกอนทางเคมี

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้เพื่อการตกตะกอน ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ โดยที่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีราคา 23 บาทต่อกิโลกรัม โซเดียมซัลไฟด์ 34 บาทต่อกิโลกรัม และกรดไฮโดรคลอริก 5.75 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

#### 1. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับให้มีค่าพีเอชหลังการตกตะกอนเป็น 10 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 บาท ซึ่งถ้าใช้น้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 110.40 บาท

#### 2. การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมโซเดียมซัลไฟด์ในปริมาณ 3 มิลลิโมลต่อลิตร เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีปริมาณสังกะสี 3 มิลลิโมลต่อลิตร จึงทำการเติมปริมาณของโซเดียมซัลไฟด์ที่อัตราส่วนเดียวกัน คือ 1:1 ดังนั้นปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่ใช้ คือ 0.037 กรัม (0.001 บาท) จากนั้นปรับให้มีค่าพีเอชหลังการตกตะกอนเป็น 9 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.45 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.006 บาท ซึ่งถ้าใช้น้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมซัลไฟด์ 25.16 บาท และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 116 บาท ดังนั้นน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร เสียค่าสารเคมีทั้งสิ้น 141.16 บาท



### 3. ค่าใช้จ่ายในการทดลองทางไฟฟ้าเคมี

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าเคมี จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยราคาค่าไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= I \text{ (A)} \times V \text{ (volt)} \times \text{time (hr)} / V \text{ (m}^3\text{)} \\
 &= \frac{(500/1000) \text{ ampere} \times 9.4 \text{ volt} \times 6 \text{ hours}}{((1.45/1000) \times 1000)} \\
 &= 19.45 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการบำบัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อ  
 ยูนิต ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 19.45 \times 2.5 \\
 &= 48.63 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีค่าใช้จ่าย 48.63 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

#### ข.2 วิธีคำนวณผลการทดลอง

##### ข.2.1 ร้อยละการกำจัด

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

$W_i$  = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

$W_f$  = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

## ข.2.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส

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

โดย n =	ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล
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(t) =	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

## ข.2.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ในที่นี้ จะนำความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ในเวลา 30 และ 90 นาที มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัด และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ โดยใช้การจัดเรียงขั้วแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.00234 โมลต่อลิตร

เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของสังกะสี 0.00222 โมลต่อลิตร

เวลา 90 นาที ความเข้มข้นของสังกะสี 0.00186 โมลต่อลิตร

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

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{(0.00234 - 0.00222) \times 100\%}{0.00234}$$

$$= 5.22\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ร้อยละการกำจัดสังกะสี คือ 5.22%

แทนค่า ที่เวลา 90 นาที

$$= \frac{(0.00234 - 0.00186) \times 100\%}{0.00234}$$

$$= 20.64\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 90 นาที ร้อยละการกำจัดสังกะสี คือ 20.64%

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

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{2 \times 96500 \times (0.00234 - 0.00186) \times 1.45 \times 100\%}{0.5 \times 30 \times 60}$$

$$= 3.81\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 3.81%

แทนค่า ที่เวลา 90 นาที

$$= \frac{2 \times 96500 \times (0.00234 - 0.00222) \times 1.45 \times 100\%}{0.5 \times 90 \times 60}$$

$$= 5.02\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 90 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 5.02%

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสหรัฐ ชาญรูปดี เกิดเมื่อวันที่ 10 เดือนเมษายน พ.ศ.2528 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย