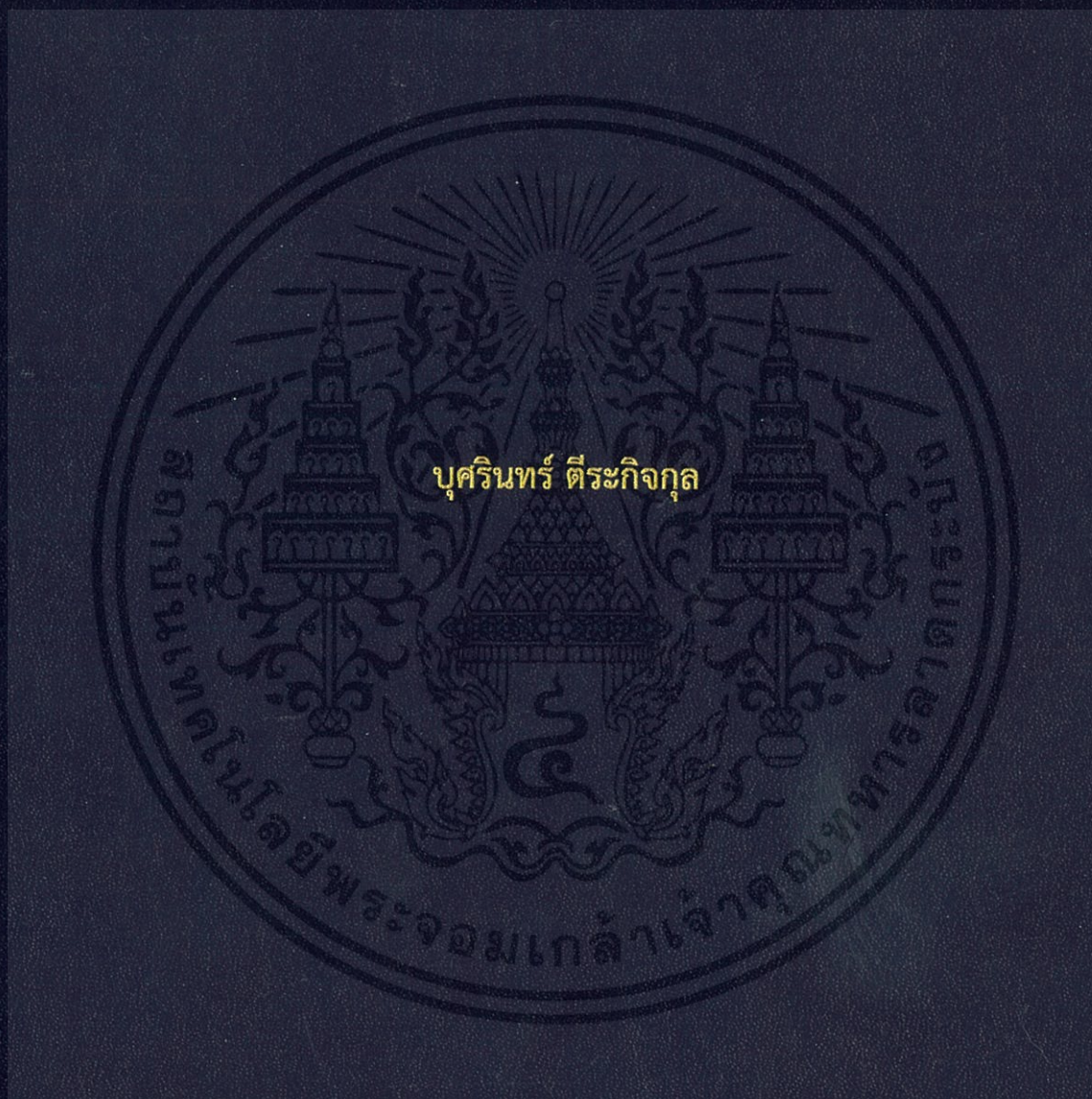


การกำจัดคอปเปอร์ไอออนในน้ำด้วยเทคโนโลยี คาปาซิทีฟ ดีไออไนเซชัน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การกำจัดคอปเปอร์ไอออนในน้ำด้วยเทคโนโลยี คาปาซิทีฟ ดีไอออไนเซชัน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Elimination Copper Ions by Capacitive Deionization Technology



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การกำจัดคอปเปอร์ไอออนในน้ำด้วยเทคโนโลยีคาปาซิฟ ดีไอออนเซชัน
โดย นางสาวบุศรินทร์ ตีระกิจกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ไกรวัฒนวงศ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

สุรัตน์ อารีรัตน์

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

วิจิตรา วงศ์พร้อมรัตน์

.....กรรมการ
(ดร. วิจิตรา วงศ์พร้อมรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การกำจัดคอปเปอร์ไอออนในน้ำด้วยเทคโนโลยีคาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน
โดย	นางสาวบุศรินทร์ ธีระกิจกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

บทคัดย่อ

การวิจัยเชิงทดลองครั้งนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการกำจัดคอปเปอร์ไอออนในน้ำด้วยวิธีคาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน ในการทดลองจะต่อระบบการไหลเป็นระบบไหลเวียน ขั้วคาร์บอนที่ใช้มีขนาด 8×2 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว คือ 2 มิลลิเมตร ให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตคงที่ที่ 249.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และวัดปริมาณไอออนจากการวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดคอปเปอร์ไอออน 2 ตัวแปร คือ อัตราการไหล 150 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที และความต่างศักย์ 0 0.8 1.0 และ 1.2 โวลต์ พบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้น จากนั้นศึกษาผลของความต่างศักย์ เพื่อดูประสิทธิภาพการดูดซับของคาร์บอน พบว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 – 0.8 โวลต์ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ และที่ 1.0 โวลต์จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อใช้ความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ ประสิทธิภาพการกำจัดจะต่ำกว่าเมื่อทำการทดลองโดยไม่ใส่กระแสไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลองใช้ ความต่างศักย์ 1 โวลต์ และ อัตราการไหล 250 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้ปริมาณการดูดซับที่สูงที่สุด คือ 1.44 มิลลิกรัมต่อกรัมของคาร์บอน

Report Title Elimination Copper Ions by Capacitive Deionization Technology
By Miss Bussarin Teerakitkul
Degree Bachelor of Engineering
Program Chemical Engineering
Year 2016
Advisor Assist. Prof. Dr. Kriangsak Kraiwattanawong

ABSTRACT

This experimental research presents the removal of copper ions in water by capacitive deionization (CDI) technology. In the experiment, the flow system is circulation system. The surface area of carbon electrodes is $8 \times 2 \text{ cm}^2$, thickness is 3 mm and distance between the electrodes is 2 mm. The initial concentration of the copper sulphate solution is fixed to be 249.5 mg/L and measure the amount of ions by the conductivity measurement. The removal performance of copper ions was investigated under different flow rate of 155, 200 and 250 ml/min and applied voltages of 0, 0.4, 0.8, 1.0 and 1.2 volt. It was found that when the flow rate was increased, the removal performance also increased. When applied voltages were increased from 0 – 0.8 volt, removal performance insignificant increased. The performance was obviously highest at 1.0 volt. But at 1.2 volt removal performance was lower than electrical was not applied. The highest removal capacity was 1.44 mg/g when 1.0 volt of electricity and 250 ml/min of flow rate was applied.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ผศ.ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒน์ วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และความช่วยเหลือในทุกด้าน

ขอขอบพระคุณ บริษัท คาร์โบกายูจัน จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ทำให้งานวิจัยดำเนินไปได้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นางสาวบุศรินทร์ ตีระกิจกุล

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 การดูดซับ	3
2.1.2 ถ่านกัมมันต์	7
2.1.3 โลหะทองแดง	9
2.1.4 คาปาซิทีฟ ดีไอโออินเซชัน	10
2.1.5 เครื่องโพรเทคชั่นซิสเต็ม	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	15
3.1 สารเคมี.....	15
3.2 อุปกรณ์.....	15
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	15
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	17
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM	17
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดคอปเปอร์ไอออน.....	18
4.2.1 ผลของอัตราการใช้เหล็กปริมาณ.....	18
4.2.1 ผลของความต่างศักย์.....	20
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	22

สารบัญ (ต่อ)

5.1 สรุปผลการทดลอง.....	22
5.2 ข้อเสนอแนะ	22
เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก.....	25
ภาคผนวก ก. ข้อมูลดิบ	25
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	51
ภาคผนวก ค. เครื่องมือและอุปกรณ์.....	55



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	4
ตารางที่ ก 1.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0 โวลต์	27
ตารางที่ ก 1.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.4 โวลต์	30
ตารางที่ ก 1.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.8 โวลต์	33
ตารางที่ ก 1.4 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.0 โวลต์	36
ตารางที่ ก 1.5 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.2 โวลต์	39
ตารางที่ ก 2.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที	42
ตารางที่ ก 2.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที	45
ตารางที่ ก 2.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 250 มิลลิลิตร/นาที	48
ตารางที่ ข 2.1 ค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต 0 – 1 มิลลิโมลาร์	51
ตารางที่ ข 3.1 ปริมาณคอปเปอร์ที่ถูกกำจัดออกที่สภาวะต่างๆ	53

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างถ่านกัมมันต์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	7
รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ	8
รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นภายในของสารดูดซับที่บรรจุในท่อ.....	9
รูปที่ 2.4 การดูดซับของไอออนเพื่อกำจัดไอออนในน้ำ	11
รูปที่ 2.5 การคายซับเพื่อรีเจนเนอเรทซ์คาร์บอน	11
รูปที่ 3.1 ระบบการไหลของการทดลอง.....	16
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	17
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	17
รูปที่ 4.3 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์)	18
รูปที่ 4.4 ปริมาณไอออนที่ถูกกำจัดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์)	19
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่มีต่อการกำจัดไอออน	19
รูปที่ 4.6 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างกัน (สภาวะการทดลอง อัตราการไหลเชิงปริมาตร 250 มิลลิลิตรต่อนาที)	20
รูปที่ 4.7 ปริมาณไอออนที่ถูกกำจัดที่ความต่างศักย์ต่างกัน (สภาวะการทดลอง อัตราการไหลเชิงปริมาตร 250 มิลลิลิตรต่อนาที)	21
รูปที่ 4.8 ผลของความต่างศักย์ที่มีต่อการกำจัดไอออน	21
รูปที่ ก 1.1 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 0 โวลต์)	29
รูปที่ ก 1.2 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 0.4 โวลต์)	32
รูปที่ ก 1.3 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 0.8 โวลต์)	35
รูปที่ ก 1.4 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์)	38
รูปที่ ก 1.5 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.2 โวลต์)	41
รูปที่ ก 2.1 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน (สภาวะการทดลอง อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที)	44

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ ก 2.2 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน (สภาวะการทดลอง อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที่)	47
รูปที่ ก 2.3 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน (สภาวะการทดลอง อัตราการไหล 250 มิลลิลิตร/นาที่)	50
รูปที่ ข 2.1 กราฟมาตรฐานค่าการนำไฟฟ้า	52
รูปที่ ข 3.1 ปริมาณที่ถูกกำจัดออกที่สภาวะต่าง ๆ	54
รูปที่ ค 1.1 หน่วยคาปาซิทีฟ ดีไอโออินเซชัน (CDI unit)	55
รูปที่ ค 1.2 เครื่องโพเทนชิออสแตท (Potentiostat)	55
รูปที่ ค 1.3 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)	55
รูปที่ ค 1.4 ปัมป์สุบจ่ายของเหลวแบบรีดท้อ (Peristaltic pump)	56
รูปที่ ค 1.5 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer)	56
รูปที่ ค 1.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมมีมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ทั้งในทางตรงและทางอ้อม และหนึ่งในผลกระทบที่ควรพิจารณาคือ โลหะหนักที่เป็นของเสียจากโรงงาน อาจอยู่ในดิน น้ำ หรืออากาศ ซึ่งมาจากกระบวนการผลิต โดยที่วัตถุดิบและสารเคมีที่ถูกปล่อยเป็นของเสียออกจากโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อมีการปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย ไม่สามารถนำน้ำนั้นมาใช้เพื่อการบริโภค อุปโภค ระบบนิเวศน์ของสิ่งมีชีวิตในน้ำถูกทำลาย เนื่องจากโลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สลายตัวในกระบวนการธรรมชาติ จึงทำให้ต้องมีการใช้กระบวนการอื่นในการกำจัดโลหะหนักออกจากรน้ำ เพื่อเป็นการนำน้ำเสียเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง

การกำจัดโลหะหนักจากรน้ำเสียเป็นสิ่งที่ต้องตระหนัก และให้ความสำคัญ เพื่อรักษาสังแวดล้อม หรือระบบนิเวศน์ทางน้ำให้ยังเป็นไปด้วยความสมดุล อีกทั้งยังทำให้น้ำเสียที่มีอยู่กลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก ซึ่งการกำจัดโลหะหนักจากรน้ำเสียทำได้หลายวิธีโดยการใช้งานจะขึ้นอยู่กับสภาพของน้ำเสียนั้น และวัตถุประสงค์ในการบำบัดว่าต้องการทำเพื่ออะไร หรือนำไปใช้งานในด้านใดต่อไป เช่น การบำบัดทางชีวภาพ การทำให้ตกตะกอนโดยใช้สารเคมี การแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน การกลั่นแยก การใช้สารดูดซับ การแยกด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นต้น และในงานวิจัยครั้งนี้เราสนใจเทคนิคที่เป็นการแยกด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่ขั้วไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า คาปาซิทีฟ ดีไอออนในเซชัน(Capacitive deionization ,CDI) ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการการดูดซับ ที่มีการใช้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้มากยิ่งขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุทำขั้วไฟฟ้า มีความโดดเด่นในเรื่องโครงสร้างที่มีรูพรุนจึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง ซึ่งวิธีนี้สามารถกำจัดไอออนที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก ใช้พลังงานต่ำ และไม่ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

โลหะหนักที่เราสนใจจะกำจัดออก คือ คอปเปอร์ หรือทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่พบได้ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน หิน น้ำ และอากาศ อาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น คอปเปอร์

ออกไซด์(Cu_2O) คอปเปอร์ซัลไฟด์(Cu_2S) คอปเปอร์ฟลูออไรด์(CuF) และคอปเปอร์ซัลเฟต(CuSO_4) เป็นต้น เนื่องจากทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ตรงจากเงิน ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ผลิตลวด สายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืช และสัตว์รบกวนต่างๆ การทำสีย้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งเราอาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การนำดื่ม การบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ดังนั้นโครงการนี้จึงทำการกำจัดคอปเปอร์ไอออนจากน้ำด้วยวิธีคาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชัน(Capacitive deionization ,CDI) เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำ และยังเพื่อการนำน้ำเสียที่มีกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการแยกคอปเปอร์ไอออนออกจากน้ำด้วยเทคโนโลยีคาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชัน (CDI)
2. ศึกษาผลของตัวแปร คือ อัตราการไหล และศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ต่อผลของการกำจัดไอออน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการแยกคอปเปอร์ไอออนออกจากน้ำด้วยเทคโนโลยี คาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชัน (CDI) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีเลขไอโอดีนนัมเบอร์ 1150 เป็นวัสดุที่ขั้ว
2. มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารละลายคอปเปอร์อยู่ระหว่าง 150-250 มิลลิลิตร ต่อ นาที
3. มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ระหว่าง 0-1.2 โวลต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการแยกสารด้วยเทคโนโลยีคาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชัน (CDI)
2. ได้พัฒนาทักษะการคิดวิเคราะห์ และการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบและมีเหตุผล
3. สามารถนำความรู้ หรือทักษะที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า(interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า สารถูกดูดซับ(adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ(adsorbent)

- ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น(multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นโดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง [1]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้ว ยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้ามและการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับพฤติกรรมของการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและเคมีการดูดซับทางเคมี [2]

- กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแกสหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี

- ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

1. ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ

ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพของการดูดซับ ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ได้แก่

1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพราะถาขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะ นอกจากนี้นี้ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก็มีผลต่อ การดูดซับเช่นกัน คือถาขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลงด้วย

1.2 ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

1.3 เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถาโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ

2.1 ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

2.2 หน้าที่ของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อหน้าที่ของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น กรณีสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้นการดูดซับจะมากขึ้นเพราะการเพิ่มหน้าที่ของโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งดูได้จากค่าการดูดซับ PCP และ TCP ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่า ความสามารถดูดซับ PCP สูงกว่า TCP เนื่องจาก PCP มีหน้าที่ของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลสูงกว่า TCP จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากกะลามะพร้าวมีความสามารถดูดซับ PCP มากกว่า TCP

2.3 ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

2.4 ผลของ $[H^+]$ หรือ pH ถ้า $[H^+]$ ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์) ได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว คอนขางจะมีประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูดซับ

2.5 ผลของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

3. ความปนปน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปนปนของระบบ ถ้าผู้มีความปนปนต่ำผลน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าผู้มีความปนปนสูงทำให้ Pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น [3]

- สมดุลการดูดซับ

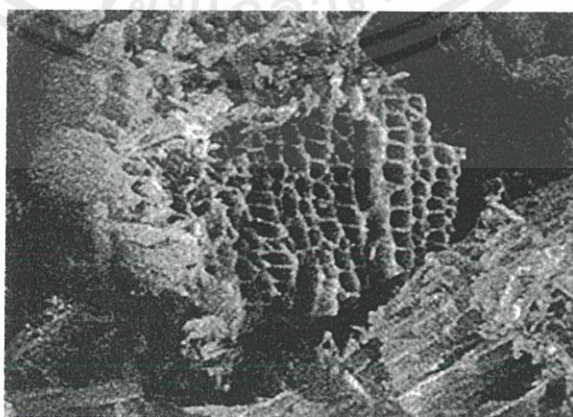
สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคของเหลว กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับ

เท่ากันการวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ [2]

2.1.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอคทีฟคาร์บอน (active carbon) หรือ แอคทีเวเตดคาร์บอน (activated carbon) เป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพ หรือประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีการกระตุ้นทางด้านวิทยาศาสตร์ เพื่อให้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก และขนาดรูพรุนก็แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิต และวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์สาร ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืช และต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ชี้อ้อย ชิงช้าไพด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซด์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดิบที่มาจาก สัตว์นั้นมีไม่มาก เช่น กระดุก หรือเขาสัตว์ เป็นต้น [4]

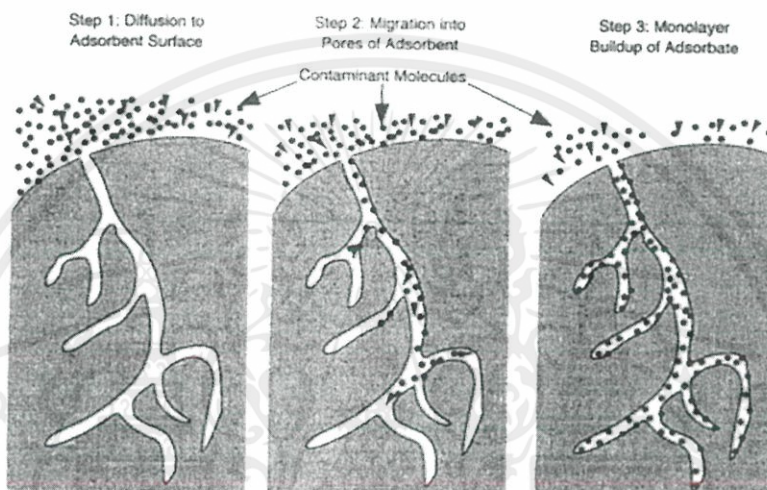


รูปที่ 2.1 โครงสร้างถ่านกัมมันต์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

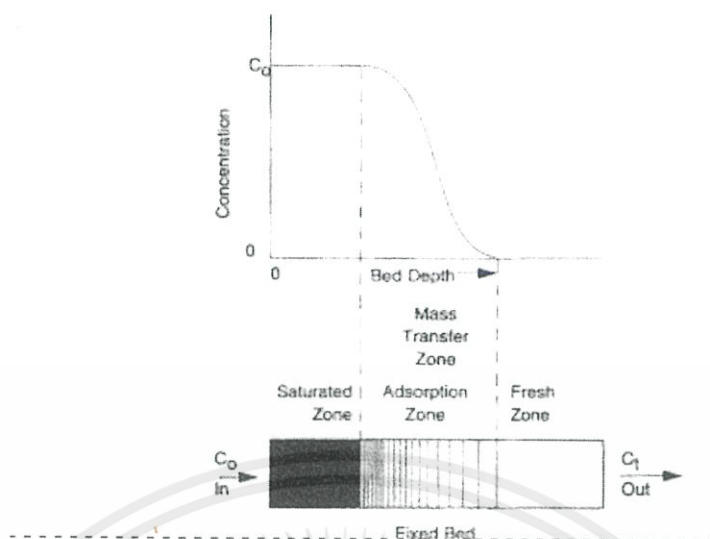
- การดูดซับของถ่านกัมมันต์

กระบวนการดูดซับสารปนเปื้อนของถ่านกัมมันต์ เกิดขึ้นเมื่อสารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดมีการเคลื่อนที่โดยการแพร่กระจายไปเกาะบนผิวรอบนอกของตัวถ่านกัมมันต์ก่อน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นรูพรุน ภายในรูจะมีช่องเป็นโพรงลดเลี้ยวไปมา ซึ่งโมเลกุลของสารปนเปื้อนสามารถเคลื่อนที่ลึกลงไปในช่องโพรง ซึ่งจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสได้มากขึ้นทำให้ดูดซับได้มากขึ้น



รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ [6]

เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาบรรจุในถังที่ใช้ดูดซับ และผ่านอากาศที่มีสารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดเข้าไปในถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ในส่วนแรกที่ได้เข้าสัมผัสกับสารปนเปื้อนในช่วงระยะเวลาหนึ่งก็จะดูดซับสารปนเปื้อนจนถึงจุดอิ่มตัว เรียกส่วนนี้ว่า Saturated Zone และส่วนของถ่านกัมมันต์ในบริเวณถัดไปซึ่งเป็นบริเวณที่ตัวกลางยังมีความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนอยู่เรียกว่า Mass Transfer Zone หรือ MTZ และส่วนของถ่านกัมมันต์ที่อยู่ถัดจากบริเวณ MTZ เป็นส่วนที่ยังคงสะอาด ยังไม่ได้มีการสัมผัสกับสารปนเปื้อนแต่อย่างใด เรียกว่า Fresh Zone



รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นภายในของสารดูดซับที่บรรจุในท่อ [6]

เมื่อเวลาผ่านไปสารปนเปื้อนที่ผ่านเข้าไปในถังบรรจุถ่านกัมมันต์จะถูกดูดซับได้มากขึ้นเรื่อยๆ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ถึงจุดอิ่มตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และส่วนของ MTZ ก็เคลื่อนที่เรื่อยๆ จนถึงสุดปลายของถ่านกัมมันต์ จนเริ่มไม่มีส่วนของถ่านกัมมันต์ที่เป็น Fresh Zone แต่อย่างไร ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่า Break Point ซึ่งหลังจากจุดนี้ไปสารปนเปื้อนก็จะไม่สามารถถูกดูดซับได้ดี จะมีการรั่วออกมาจากระบบได้ ควรจะมีการหยุดการทำงานของระบบ เพื่อนำตัวกลางไปรีเจนเนอเรท(regenerate) หรือมีการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ใหม่ [6]

- ค่าที่บ่งบอกสมบัติของถ่านกัมมันต์

ไอโอดีนัมเบอร์ (iodine number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไอโอดีนถูกถ่านดูดซับได้ดี ดังนั้นค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยวัดเป็นมิลลิกรัม (ของไอโอดีน) / น้ำหนักถ่าน 1 กรัม [7]

2.1.3 โลหะทองแดง (Copper)

ทองแดงเป็นโลหะชนิดแรกๆ ที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้งาน จากหลักฐานพบว่า มนุษย์รู้จักการถลุงทองแดงขึ้นมา ใช้ทำเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ มาตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ แม้ว่าทองแดงจะมีปริมาณน้อยมาก ในเปลือกโลก (เพียง 0.0001%) เมื่อเทียบกับโลหะอื่นอย่างเหล็ก (5%) หรืออลูมิเนียม (8%) แต่ทองแดงเป็นโลหะมีตระกูล ซึ่งสามารถพบได้ทั้งในรูปอิสระ และในรูปสารประกอบ ซึ่งสามารถถลุงออกมาเป็นโลหะได้ง่าย การถลุงทองแดงปัจจุบัน จะนำสินแร่ทองแดง เช่น แร่ ชาลโคไซด์ (Chalcocite, Cu_2S) แร่ชาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite, $CuFeS_2$) เป็นต้น มาเผาในอากาศ จะได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ประมาณ 97-99% จากนั้นจึงนำมาผ่าน กระบวนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อให้ได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99%

ประโยชน์ของทองแดง ที่เรารู้กันดีที่สุดในสมัยนี้ก็คือ การนำมาใช้ทำลวดส่งกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับสองรองจากเงิน แต่ราคาถูกกว่าเงินมาก การที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้ดี ช่วยลดพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อน ขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายไฟ และยังช่วยป้องกันอันตราย จากการไหม้ของสายไฟอีกด้วย นอกจากนี้ ทองแดงยังเป็นส่วนผสมสำคัญของโลหะผสมหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (ทองแดงผสมกับสังกะสี) สำริด (ทองแดงผสมกับดีบุก) โมเนล (ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และแมงกานีส) รวมทั้งยังใช้ผสมในเงินและทอง เพื่อเพิ่มความแข็งของโลหะมีค่าเหล่านั้น สำหรับใช้ทำเครื่องประดับและเหรียญตราต่างๆ

จุดเด่นอีกอย่างหนึ่งของทองแดงก็คือ ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก แม้ในสภาวะกัดกร่อนอย่างรุนแรง เช่น ในน้ำทะเล จากการสำรวจซากเรือที่จมอยู่ใต้ทะเล ตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 16 ครั้งหนึ่งพบวาร์อก (pulley) ที่ทำจากทองแดง ยังสามารถใช้งานได้ดี สมบัติพิเศษอีกประการหนึ่งคือ ทองแดงเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเล็กๆ หลายชนิด จึงถูกนำมาใช้เป็นปลอกหุ้มแผ่นไม้ ที่ใช้ต่อเรือเดินทะเล เพื่อป้องกันไม่ให้แมลงหรือเพรียงทำลายไม้ รวมทั้งทำเป็นท่อส่งน้ำดื่ม สารประกอบทองแดงบางชนิด เช่น จุนสี (blue vitriol) หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค และเชื้อราในแหล่งน้ำ การใช้ ทองแดงในการกำจัดสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ในแหล่งน้ำดังกล่าวนี้ ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์แต่อย่างใด หากว่า ร่างกายไม่ได้รับทองแดงเป็นปริมาณมาก จนเกินกว่าที่จะขับออกได้ทัน [8]

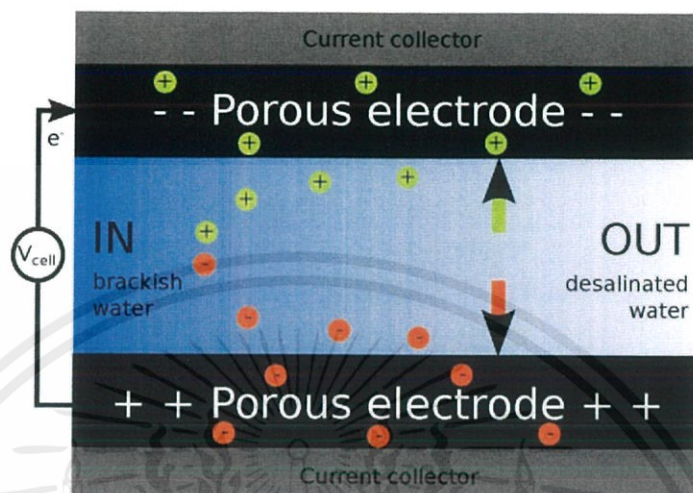
2.1.4 คาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน (Capacitive deionization, CDI)

คาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน(CDI) คือ เทคโนโลยีเพื่อกำจัดไอออนจากน้ำ โดยการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าถ่านกัมมันต์ ประจุลบจะถูกกำจัดออกจากน้ำและถูกเก็บไว้ที่ขั้วบวก ในทำนองเดียวกัน ประจุลบจะถูกเก็บไว้ที่ขั้วลบ ปัจจุบัน คาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน(CDI) ถูกใช้ส่วนใหญ่สำหรับการกำจัดเกลือในน้ำกร่อย (น้ำที่มีความเข้มข้นของเกลือต่ำกว่า 10กรัม/ลิตร) และถูกพิจารณาว่าเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพราะว่า คาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน (CDI) เป็นการกำจัดไอออนออกจากน้ำ ขณะที่เทคโนโลยีอื่นเป็นการสกัดน้ำออกจากสารละลาย ในอดีต คาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน (CDI) ถูกเรียกว่า อิเล็กโทรซอร์พชัน (electrosorption)

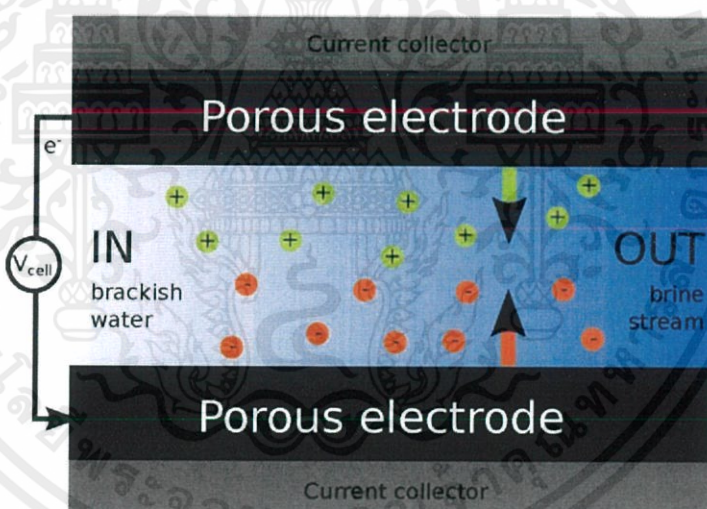
- ระยะเวลาดูดซับและคายซับ

วงจรการดำเนินการของคาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน(CDI) แบ่งเป็น 2 ระยะเวลา คือการดูดซับและการคายซับ โดยที่ระยะเวลาดูดซับจะเกิดระหว่างการกำจัดไอออนออกจากน้ำ และระยะการคายซับจะเกิดเมื่อกำจัดไอออนออกจากขั้วไฟฟ้า เมื่อขั้วไฟฟ้าอิ่มตัวด้วยไอออนแล้ว จะต้องทำการรีเจนเนอเรทขั้วไฟฟ้า โดยไอออนที่ถูกดูดซับไว้จะต้องถูกปลดปล่อยเพื่อให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานได้ใหม่ โดยการใช้

ความต่างศักย์ในทิศทางย้อนกลับ หรือลดให้เหลือเป็นศูนย์ ซึ่งเมื่อไอออนออกจากรูของถ่านกัมมันต์ จะไหลออกจากเซลล์ของคาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชัน(CDI) เป็นสารที่มีความเข้มข้นสูง และในส่วนของ การใช้พลังงานในระยะเวลาการดูดซับ สามารถถูกนำมาใช้ใหม่ระหว่างขั้นตอนการคายซับได้ด้วย



รูปที่ 2.4 การดูดซับของไอออนเพื่อกำจัดไอออนในน้ำ [9]



รูปที่ 2.5 การคายซับเพื่อรีเจนเนอเรทขั้วคาร์บอน [9]

- การดำเนินการแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

ในระหว่างระยะของการดูดซับในการใช้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ความเข้มข้นของสารทางออกลดลง แต่อีกสักครู่ ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง นั่นสามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกยังไม่มีไอออนที่ถูกดูดซับไว้ในขั้วทำให้แรงขับเคลื่อน (ความต่างศักย์) ของทั้งสองขั้วยังมีมากอยู่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปมีไอออนที่ถูกดูดซับมากขึ้นทำให้แรงขับเคลื่อนลดน้อยลง เป็นสาเหตุของอัตราการดูดซับที่ลดลง และความเข้มข้นของสารทางออกที่เพิ่มขึ้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วัสดุในการทำขั้วไฟฟ้า

เพื่อประสิทธิภาพที่ดีของคาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน(CDI) ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุที่มีคุณภาพคือสิ่งที่สำคัญที่สุด ถ่านกัมมันต์คือวัสดุที่มีรูพรุนที่เป็นตัวเลือกที่จะใช้เป็นวัสดุในการทำขั้วไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาจากโครงสร้างและคุณสมบัติอื่นๆ โดยสิ่งสำคัญคือ ปริมาณการดูดซับที่สูง โดยที่พื้นที่ผิว และขนาดของรูพรุนของคาร์บอนควรจะใหญ่พอที่ไอออนจะสามารถเข้าได้ นอกจากนี้ วัสดุที่ใช้ควรจะมีเสถียร และไม่ทำให้ขั้วไฟฟ้าเสื่อม ไอออนควรจะสามารถผ่านโครงข่ายของรูพรุนภายในคาร์บอนได้อย่างรวดเร็ว และควรมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงด้วย สุดท้ายราคาเป็นส่วนหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกวัสดุด้วย

ปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้อย่างมากเพราะถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในราคาที่เหมาะสม คาร์บอนกัมมันต์ทำจากวัสดุทางธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้นก็ได้ ส่วนคาร์บอนอื่นๆ ที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้า เช่น เมโซพอร์สคาร์บอน คาร์บอนแอโรเจล คาร์บอนนาโนทิวบ์ กราฟีน หรือ คาร์บอนแบล็ค เป็นต้น เมื่อไม่นานนี้มีการศึกษาพบว่าไมโครพอร์สคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่รูพรุนขนาดน้อยกว่า 1.1 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับการดูดซับด้วยเทคโนโลยีคาปาซิทีฟ ดีไอออนเซชัน(CDI) [9]

2.1.5 เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

โพเทนชิโอสแตท (potentiostat) หรือเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าโดยการทำงานจะทำโดยให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) วัดสัญญาณเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) และมีขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากภายนอกให้กลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ โพเทนชิโอสแตทเป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีซึ่งเป็นตัวควบคุมการจ่ายความต่างศักย์ และวัดกระแสไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงและถูกต้องสูง ในปัจจุบันโพเทนชิโอสแตท จะต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์และมีซอฟต์แวร์ ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน และแสดงผลการวิเคราะห์ ทำให้สามารถทำงานได้โดยสะดวก เครื่องโพเทนชิโอสแตทจะถูกต่อไปยังเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบสามขั้ว (three-electrode electrochemical cell) ขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ

- 1) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ปฏิกิริยาของสารที่ต้องการวิเคราะห์จะเกิดขึ้น โดยทั่วไปทำด้วยวัสดุที่มีความเสถียรสูง เช่น แพลตินัม ทอง หรือ คาร์บอนอสัณฐาน
- 2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความต่างศักย์คงที่ และมีหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นค่าเปรียบเทียบซึ่งทำให้เรารู้ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน

3) ขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary หรือ counter electrode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้ระบบครบวงจร วัสดุที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ลวดแพลตินัม [10]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhaolin Chen et al[11] ศึกษาปริมาณการดูดซับของไอออนโดยใช้เทคโนโลยีคาปาซิทิฟ ดีไอโออินเซชัน(CDI) ที่ความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ ในตอนแรกเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารละลายที่มีไอออนประจุ 1- 2- และ 3- พบว่าประจุ 1- ถูกดูดซับไปมากที่สุด ตามด้วยประจุ 2- และประจุ 3- ตามลำดับและพบว่าไอออนที่มีประจุ -1 เหมือนกัน แต่ hydrate radius ต่ำกว่าจะถูกดูดซับได้ดีกว่าสรุปได้ว่าปริมาณของไอออนที่ถูกดูดซับจะขึ้นกับ ionic charge และ hydrate radius ในตอนที่สองทำการผสมสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายโซเดียมไนเตรต เข้าด้วยกันโดยที่ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรตที่ 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิโมลาร์ โดยที่ให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์คงที่ที่ 5.0 มิลลิโมลาร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไนเตรตไอออนน้อยกว่า ปริมาณการดูดซับของคลอไรด์ไอออนจะมากกว่า และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไนเตรตไอออนปริมาณการดูดซับของไนเตรตไอออนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เท่ากัน พบว่าปริมาณการดูดซับของไนเตรตไอออนจะสูงกว่า โดยในช่วงแรกคลอไรด์ไอออนจะถูกดูดซับมากกว่า แต่ในช่วงหลังจะเกิดการแทนที่ด้วยไนเตรตไอออนแทน เนื่องจากค่าคงที่สมดุลของไนเตรตไอออนและคลอไรด์ไอออน สรุปได้ว่า การเลือกจับในการดูดซับของไนเตรตไอออนจะเหนือกว่าคลอไรด์ไอออน

Edip Bayram et al[12] ศึกษาการใช้เทคโนโลยีคาปาซิทิฟ ดีไอโออินเซชัน(CDI) ซึ่งเป็นชุดการทดลองแบบไหลผ่าน ในการกำจัดเบนโซอิกแอซิดจากสารละลายเจือจาง โดยศึกษาถึงผลของตัวแปร คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ และอัตราการไหลเชิงปริมาตร ในการทดลองจะใช้ค่าความต่างศักย์ 200 600 และ 900 มิลลิโวลต์ ในกระบวนการอิเล็กโทรซอร์ปชัน(Electrosorption) พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์จาก 200 ถึง 600 มิลลิโวลต์ ปริมาณการดูดซับสารเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ความต่างศักย์ 600 มิลลิโวลต์ จะมีปริมาณการดูดซับสารสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มจาก 600 ถึง 900 มิลลิโวลต์ พบว่าปริมาณการดูดซับลดลง สาเหตุมาจากความต่างศักย์ที่สูงกว่า 600 มิลลิโวลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผลตออกซิเจน ซึ่งอาจไปปิดกั้นทางเข้าของรูพรุนที่ขั้วคาร์บอนอิเล็กโทรด และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า -200 -600 และ -900 มิลลิโวลต์ เมื่อความต่างศักย์ต่ำลงจะทำให้เกิดการคายซับได้ดีมากยิ่งขึ้น ต่อมาศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงปริมาตร พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 5 ถึง 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที ให้อัตราการกำจัดเบนโซอิกแอซิดสูงที่สุด โดยที่การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดทำได้โดยการลดข้อจำกัดของอัตราการถ่ายเทมวลภายนอกโดยการเพิ่มอัตราการไหลนั่นเองนอกจากนี้ยังศึกษาถึงการรีเจนเนอเรทขั้วคาร์บอนเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่ง

ใช้ความต่างศักย์ -900 มิลลิโวลต์ พบว่ามีถึง 80% ของซัลไฟด์ไฮไดรด์ที่จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

Zhang Yun-Hua et al[13] ศึกษาถึงประสิทธิภาพของเทคโนโลยีคาปาซิทีฟ ดีไอโอไนเซชัน(CDI) ซึ่งการใช้เทคโนโลยีนี้เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ใช้พลังงานต่ำ ค่าปฏิบัติการต่ำ และไม่ทำให้เกิดมลพิษเพิ่มอีกด้วย โดยใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง จะกำจัดไอออนได้ 80% โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าแล้วเหลือเพียง 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ซึ่งน้อยกว่าค่ามาตรฐานของ WISCO (ต้องน้อยกว่า 400 $\mu\text{s}/\text{cm}$ จึงจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้) กล่าวได้ว่าการใช้เทคโนโลยีคาปาซิทีฟ ดีไอโอไนเซชัน(CDI) เหมาะสมสำหรับการกำจัดไอออนจากน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลตั้งแต่ 500 ถึง 1000 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสาร ซึ่งเมื่ออัตราการไหลเป็น 500 ถึง 1000 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเหลือ 350 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ซึ่งยังต่ำกว่าค่ามาตรฐานของ WISCO ในการนำกลับมาใช้ใหม่ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลแล้วพบว่าการใช้พลังงานในการดำเนินการ จะลดลง ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งคือค่า COD และ pH มีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Shu-Yun Huang et al[14] ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีคาปาซิทีฟ ดีไอโอไนเซชัน(CDI) กำจัดคอปเปอร์ไอออน ในตอนแรกทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ที่ใช้ตั้งแต่ 0.0 จนถึง 1.2 โวลต์ ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้า 194 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และค่า pH 5 ระหว่างการทดลองพบว่าค่า pH อยู่ในช่วง 4.5-5.1 ซึ่งทำให้แน่ใจว่า ไม่มีการตกตะกอนของคอปเปอร์และการไฮโดรไลซิสของน้ำเกิดขึ้น และเมื่อดูจากปริมาณของคอปเปอร์ที่ถูกกำจัดออก พบว่าเมื่อมีการใช้ความต่างศักย์มีมากกว่า 0.0 โวลต์ จะทำให้การกำจัดนั้นดีขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นมีการสังเกตลักษณะของการกำจัดบนขั้วคาร์บอนพบว่าเมื่อใช้ 0.4 โวลต์ ขั้วคาร์บอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งหมายความว่า ไม่มีการเกิดขึ้นของปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชันแต่เมื่อใช้ 0.8 โวลต์ พบว่ามีอนุภาคเกิดขึ้นเล็กน้อยบนขั้วคาร์บอน และเมื่อใช้ 1.2 โวลต์ พบว่าเกิดอนุภาคขนาดเล็กปกคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของขั้วคาร์บอนนั้นหมายความว่า ในการกำจัดคอปเปอร์ไอออนนั้นไม่มีเพียงแต่ผล จากอิเล็คโตรสแตติก(Electrostatic) เพียงเท่านั้นแต่ยังมีผลจาก อิเล็คโตรซอร์พชัน(Electrosorption) ด้วย หรือสรุปได้ว่าคอปเปอร์ไอออนถูกกำจัดโดยกระบวนการอิเล็คโตรซอร์พชัน(Electrosorption) ด้วยการใช้ความต่างศักย์ในช่วง 0.0-0.8 โวลต์ เท่านั้นและเมื่อทำการรีเจนเนอเรทขั้วคาร์บอนกลับมาใช้ใหม่ พบว่ามีเพียง 69% ของคอปเปอร์เท่านั้นที่หลุดออกมา สรุปได้ว่า คอปเปอร์ไอออนมีความดึงดูดกันกับขั้วคาร์บอนและพบว่าเกิดความผันผวนของค่า pH อาจมีสาเหตุจากการเกิด ปฏิกิริยารีดอกซ์ และเกิดหมู่ฟังก์ชันบนคาร์บอน จากนั้นมีการทดลองเพื่อดูการแข่งขันของคอปเปอร์ไอออนกับ โซเดียมคลอไรด์ สารประกอบอินทรีย์และซิลิกา พบว่าขั้วคาร์บอนมีการเลือกจับ คอปเปอร์ไอออนมากกว่าตัวอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

3.1 สารเคมี

1. คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)

3.2 อุปกรณ์

1. หน่วยคาปาซิทีฟ ดีไอโอไนเซชัน (หน่วย CDI)
2. เครื่องโพเทนชิโอสแตท
3. บีมสูบจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ
4. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
5. เครื่องกวนสารละลาย

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

เตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

1. ความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ (249.5 มิลลิกรัม/ลิตร)
2. เจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้น 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 มิลลิโมลาร์

สร้างกราฟมาตรฐานของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า และความเข้มข้น

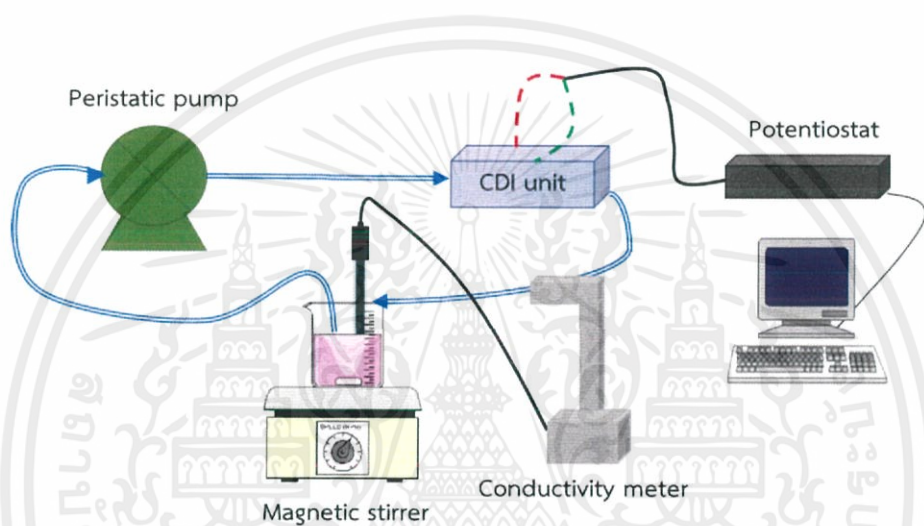
1. วัดค่าการนำไฟฟ้าของ น้ำกลั่น และสารละลายคอปเปอร์ที่มีความเข้มข้น 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 มิลลิโมลาร์
2. พล็อตกราฟระหว่างค่าการนำไฟฟ้า(แกน y) และความเข้มข้น(แกน x)

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด (อัตราการใช้ ระยะเวลา ระยะเวลาพัก)

1. เตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อจัดเตรียมระบบการไหลของการทดลองให้เป็นระบบไหลวน (ดังรูปที่ 1)
3. วางบีกเกอร์บรรจุสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตบนเครื่องปั่นกวน พร้อมเปิดใช้งานเครื่องปั่นกวน
4. นำโพรบวัดค่าการนำไฟฟ้าจุ่มในถังสารละลายและวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยบันทึกค่าทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านเครื่องโพเทนชิโอสแตท โดยใช้ความต่างศักย์ 0 – 1.2 โวลต์
6. เปิดปั๊มโดยใช้อัตราการไหลเป็น 150 – 250 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นให้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าวัด และบันทึกค่าการนำไฟฟ้าจนครบ 180 นาที
7. ปิดการทำงานของปั๊ม เครื่องโพเทนชิโอสแตท เครื่องปั่นกวน และเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
8. ถ่ายน้ำออกจากระบบ เพื่อทำการรีเจนเนอเรทซ์คาร์บอนต่อไป
9. ทำการรีเจนเนอเรทซ์คาร์บอนโดยการใช้ น้ำกลั่น และไม่ใส่กระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 ระบบการไหลของการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับด้วยเทคนิค จุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า



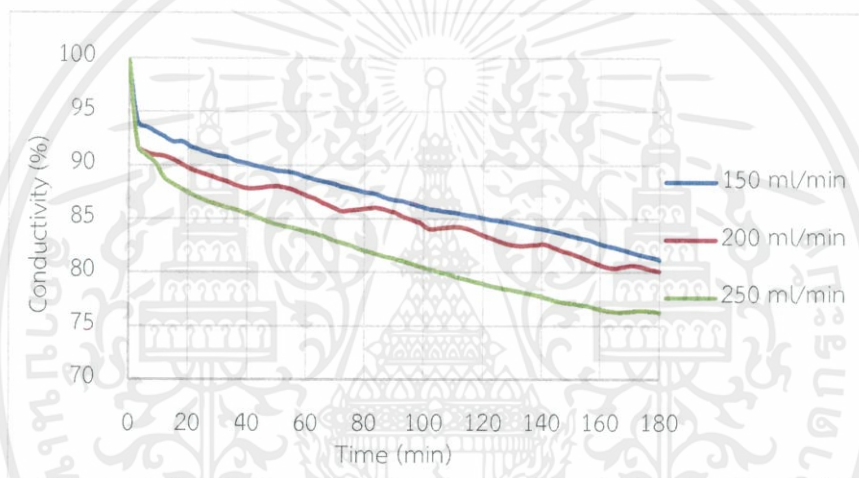
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นพื้นผิว และรูพรุนของคาร์บอนที่ใช้ในการทำชีวคาร์บอน
ในหน่วยคาปาศีทีฟ ดีไอออไนเซชัน

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดคอปเปอร์ไอออน

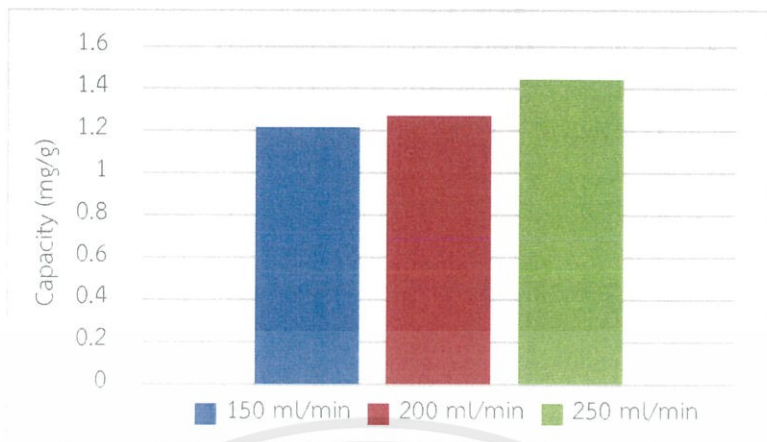
4.2.1 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตร

การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่มีผลต่อการกำจัดคอปเปอร์ไอออน ในช่วงอัตราการไหล 150 – 250 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีสถานะการทดลอง ที่ความต่างศักย์คงที่ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 249.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร พบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความจุในการกำจัด (Removal capacity) เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น จำนวนรอบที่สารละลายจะวนมาสัมผัสกับตัวดูดซับจะมากขึ้น ทำให้กำจัดไอออนได้ในปริมาณที่มากขึ้น

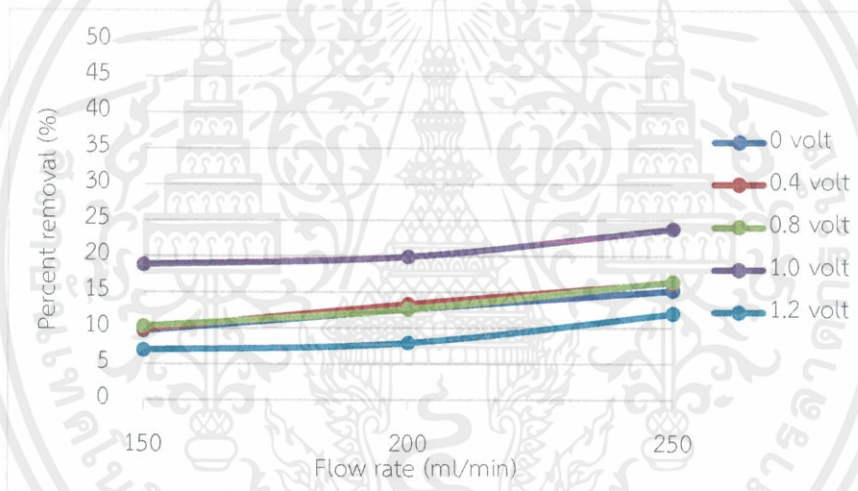


รูปที่ 4.3 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สถานะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงได้มากขึ้น หรือกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสูงขึ้น เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น โดยในช่วง 5 นาทีแรก จะลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะลดลงอย่างค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งในนาทีที่ 160 จนถึงนาทีที่ 180 อัตราการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าจะเริ่มช้าลง แต่ก็ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว



รูปที่ 4.4 ปริมาณไอออนที่ถูกกำจัดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์)

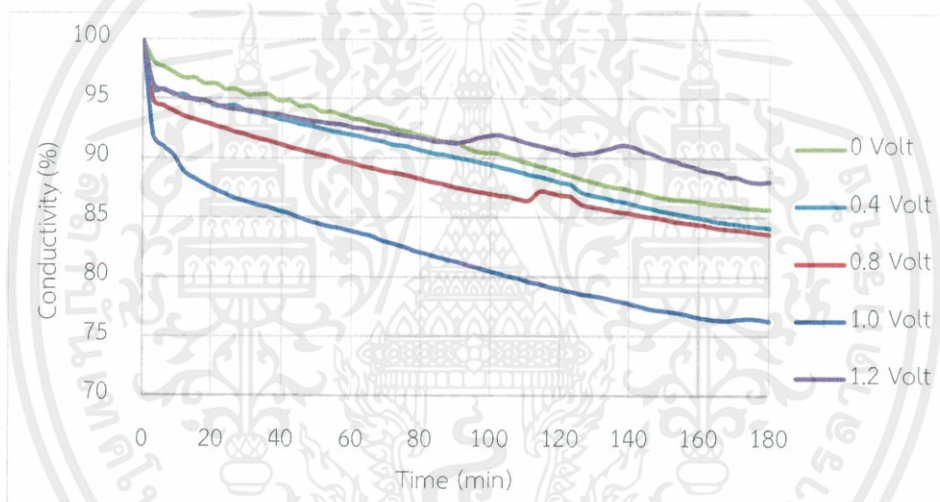


รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่มีต่อการกำจัดไอออน

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงให้เห็นถึงปริมาณ และเปอร์เซ็นต์ไอออนที่ถูกกำจัด ที่อัตราการไหลต่างๆ จะเห็นว่าปริมาณไอออนที่กำจัดได้นั้น สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันในทุกๆความต่างศักย์ โดยที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงสุดที่ สภาวะอัตราการไหล 250 มิลลิลิตรต่ออนาที ความต่างศักย์ 1 โวลต์ มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดอยู่ที่ประมาณ 25% ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Shu-Yun Huang และคณะ ซึ่งกำจัดได้สูงสุดถึงประมาณ 90%

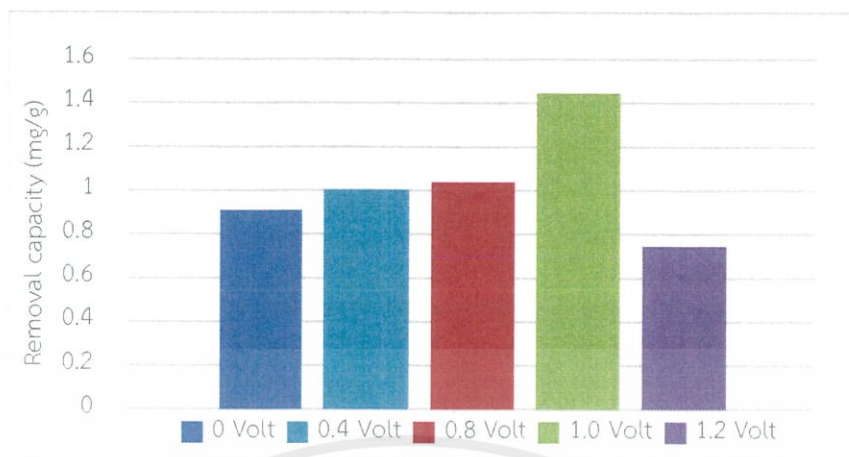
4.2.2 ผลของความต่างศักย์

การศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ที่มีผลต่อการกำจัดคอปเปอร์ไอออน ในช่วง 0 – 1.2 โวลต์ ซึ่งได้อ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ ซึ่งใช้ความต่างศักย์อยู่ในช่วงประมาณนี้ พบว่า ที่ความต่างศักย์ 0 0.4 และ 0.8 โวลต์ สามารถกำจัดไอออนได้ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย และจะกำจัดไอออนได้มากที่สุดที่ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์ แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เป็น 1.2 โวลต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนจะลดลงจนต่ำกว่าการทดลองที่ไม่ใส่กระแสไฟฟ้า (0 โวลต์) ซึ่งจากงานวิจัยของ Shu-Yun Huang และคณะ จะทำการวัดค่าความเป็นกรดเบส เพื่อดูว่ามีการแตกตัวของน้ำเกิดขึ้นหรือไม่ ซึ่งในการทดลองนี้อาจมีการแตกตัวของน้ำทำให้มีไอออนในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าออกมาทำให้มีค่าสูงกว่า ที่การทดลองเมื่อไม่ใส่กระแสไฟฟ้า



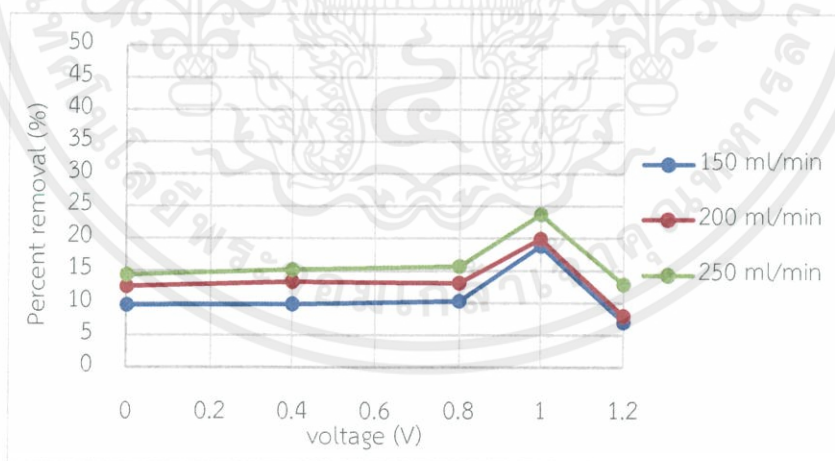
รูปที่ 4.6 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างกัน
(สภาวะการทดลอง อัตราการไหลเชิงปริมาตร 250 มิลลิลิตรต่อนาที)

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น จาก 0 โวลต์ ถึง 1.0 โวลต์ ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงได้มากขึ้น หรือประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น โดยที่สภาวะการทดลองเมื่อใช้ความต่างศักย์ 1 โวลต์ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุดอย่างชัดเจน และเมื่อใช้ความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ ประสิทธิภาพในการกำจัด ต่ำกว่าการทดลองที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (0 โวลต์)



รูปที่ 4.7 ปริมาณไอออนที่ถูกกำจัดที่ความต่างศักย์ต่างกัน
(สภาวะการทดลอง อัตราการไหลเชิงปริมาตร 250 มิลลิลิตรต่อนาที)

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงปริมาณไอออนที่ถูกกำจัดที่ความต่างศักย์ต่างๆ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์จนถึง 1.0 โวลต์ ปริมาณไอออนที่สามารถกำจัดได้จะสูงขึ้น และที่ 1.2 โวลต์ ปริมาณไอออนที่ถูกกำจัดจะต่ำกว่าที่ 0 โวลต์ สภาวะการทดลองที่กำจัดไอออนได้สูงสุดคือที่ 1.0 โวลต์ ซึ่งจะสามารถกำจัดได้ประมาณ 1.44 มิลลิกรัมต่อกรัมของคาร์บอน เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่ใส่กระแสไฟฟ้า (0 โวลต์) ที่กำจัดได้ประมาณ 0.91 มิลลิกรัมต่อกรัมของคาร์บอน จะเห็นว่าสามารถกำจัดได้มากขึ้น 0.53 มิลลิกรัมต่อกรัมของคาร์บอน หรือกำจัดได้มากขึ้นคิดเป็น 58%



รูปที่ 4.8 ผลของความต่างศักย์ที่มีต่อการกำจัดไอออน

จากรูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนที่สภาวะต่างๆ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนที่ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์ จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และที่การทดลอง 1.2 โวลต์ เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนจะต่ำที่สุด และต่ำกว่าที่การทดลองเมื่อไม่ใส่กระแสไฟฟ้าด้วย โดยที่จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันในทุกๆ อัตราการไหล

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการกำจัดคอปเปอร์ไอออนด้วยวิธีคาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชัน โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดจาก 2 ปัจจัย คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร และความต่างศักย์ที่ใช้ พบว่า ที่อัตราการไหล 250 มิลลิลิตรต่อนาที จะกำจัดไอออนได้มากกว่าที่อัตราการไหล 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ทุกๆความต่างศักย์ หรือกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตร จะทำให้กำจัดไอออนได้ในปริมาณมากขึ้น และเมื่อศึกษาผลจากความต่างศักย์ที่ใช้ พบว่า เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 - 0.8 โวลต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนจะเพิ่มขึ้นแค่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และที่ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์ จะกำจัดไอออนได้ปริมาณมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อใช้ความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ ให้ผลการกำจัดไอออนที่ต่ำกว่าในสถานะที่ไม่ใส่กระแสไฟฟ้า โดยได้ผลที่เหมือนกันในทุกๆอัตราการไหล สรุปได้จากการทดลอง อัตราการไหล และความต่างศักย์ ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนได้ดีที่สุดสำหรับหน่วยคาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชันนี้ คือ 250 มิลลิลิตรต่อนาที และ 1.0 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งที่สถานะนี้ปริมาณไอออนที่กำจัดได้สูงสุดเท่ากับ 1.44 มิลลิกรัมต่อกรัมของคาร์บอน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. หน่วยคาปาซิทีฟ ดีไอออนไนเซชันที่ใช้ ได้ทำการประกอบขึ้นเอง ซึ่งบริเวณช่องว่างภายในตัวโมดูลมีมากเกินไป ทำให้สารละลายมีโอกาสที่จะได้สัมผัสกับขั้วคาร์บอนน้อย เกิดการดูดซับน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโมดูลตัวนี้ไม่ดีนัก หากมีการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป ควรออกแบบตัวโมดูลให้ปริมาตรช่องว่างภายในนั้นน้อยที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนให้สูงขึ้น และควรออกแบบการต่อไฟฟ้ากับขั้วคาร์บอนให้สามารถจ่ายไฟฟ้าผ่านขั้วคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอทั่วทั้งขั้วคาร์บอน

2. คาร์บอนที่ใช้ในการทำขั้วในงานวิจัยนี้ได้ขอความอนุเคราะห์จากบริษัทคาโบกาญจน์ ซึ่งเป็นผงคาร์บอนเกรดการค้า อาจมีการปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของผงคาร์บอนเพื่อการดูดซับที่ดีมากขึ้น

3. ความหนาของขั้วคาร์บอนอาจมากเกินไป ทำให้มีความต้านทานสูง จึงทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ใส่ลงไปบนขั้วนั้นไม่สามารถเหนี่ยวนำไอออน หรือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้มากเท่าที่ควรจะเป็น

3. ในการทดลองจะทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งพบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าความผิดพลาดและเปลี่ยนแปลงได้ง่ายมากๆ ในการทดลองใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ เนื่องจากว่าวิธีคาปาซิทีฟ ดีไอออนในเซชันนั้นเหมาะกับการกำจัดในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดออกมาอาจผิดพลาดได้ง่าย จึงอาจจะวัดปริมาณการกำจัดไอออนจากวิธีอื่น

4. ในขั้นตอนการรีเจนเนอเรทซ์คาร์บอนอาจจะทำไม่ได้ 100% ทำให้มีไอออนติดค้างอยู่ภายในรูพรุน ซึ่งหากมีการศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดควรใช้ขั้วไฟฟ้าใหม่ทุกการทดลอง



เอกสารอ้างอิง

- [1] “การดูดซับ | Pradthana’s Weblog.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://pradthana.wordpress.com/tag/การดูดซับ/>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 16 ตุลาคม 2559).
- [2] pradthana, “กระบวนการดูดซับ(Adsorption Process),” *Pradthana’s Weblog*, (สืบค้นข้อมูลวันที่: 5 พฤษภาคม 2560).
- [3] “SCI_59_08.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [:https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:pRdSffjRpZ8J:https://www2.mtec.or.th/th/emagazine/countfavor_column.asp%3Fa%3Dload%26fileid%3D111%26Run_no%3Ddlkeszve+&cd=9&hl=th&ct=clnk&gl=th](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:pRdSffjRpZ8J:https://www2.mtec.or.th/th/emagazine/countfavor_column.asp%3Fa%3Dload%26fileid%3D111%26Run_no%3Ddlkeszve+&cd=9&hl=th&ct=clnk&gl=th). (สืบค้นข้อมูลวันที่: 5 พฤษภาคม 2560).
- [4] “ถ่านกัมมันต์(active carbon).” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache%3Au522JGpyigsJ%3Awww.napatsarun.com%2Fcarbon.doc%20&cd=7&hl=th&ct=clnk&gl=th>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 ตุลาคม 2559).
- [5] PRISTINE FILTRATION, “PRISTINE FILTRATION, INC. - More About Activated Carbon - Montrose, CO,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [:http://www.pristinefiltration.com/More-About-Activated-Carbon.html](http://www.pristinefiltration.com/More-About-Activated-Carbon.html). (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 ตุลาคม 2559).
- [6] “ออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.pcd.go.th/Info_Serv/Datasmell/design_absorbtion.htm. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 ตุลาคม 2559).
- [7] Admin, “สารน่ารู้: ถ่านปลุกฤทธิ์.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/552-2016-02-09-03-10-28>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 ตุลาคม 2559).
- [8] “ทองแดง.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/DECEMBER/radio12-2.htm>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 5 พฤษภาคม 2560).
- [9] Wikipedia, “Capacitive deionization,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitive_deionization. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 21 ตุลาคม 2559).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] “Potentiostat.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:pRdSffjRpZ8J:https://www2.mtec.or.th/th/emagazine/countfavor_column.asp%3Fa%3Dload%26fileid%3D111%26Run_no%3Ddlkesztve+&cd=9&hl=th&ct=clnk&gl=th. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 5 พฤษภาคม 2560).
- [11] Z. Chen, H. Zhang, C. Wu, Y. Wang, and W. Li, “A study of electrosorption selectivity of anions by activated carbon electrodes in capacitive deionization,” *Desalination*, vol. 369, pp. 46–50, Aug. 2015.
- [12] E. Bayram and E. Ayranci, “Electrosorption based waste water treatment system using activated carbon cloth electrode: Electrosorption of benzoic acid from a flow-through electrolytic cell,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 86, pp. 113–118, Feb. 2012.
- [13] Y. ZHANG, F. GAN, M. LI, D. WANG, Z. HUANG, and Y. GAO, “Treatment of Reused Comprehensive Wastewater in Iron and Steel Industry With Electrosorption Technology,” *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 18, no. 6, pp. 37–42, Jun. 2011.
- [14] S.-Y. Huang, C.-S. Fan, and C.-H. Hou, “Electro-enhanced removal of copper ions from aqueous solutions by capacitive deionization,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 278, pp. 8–15, Aug. 2014.
- [15] “Scanning Electron Microscope.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:
http://dxline.org/img/term/sem-13404_2.jpg. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 5 พฤษภาคม 2560).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลดิบ

1. ข้อมูลเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงปริมาตร

ตารางที่ ก 1.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0 โวลต์

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
0	210.0	100.00	219.0	100.00	215.0	100.00
3	205.0	97.62	213.0	97.26	209.0	97.21
6	204.0	97.14	212.0	96.80	208.0	96.74
9	203.0	96.67	212.0	96.80	207.0	96.28
12	203.0	96.67	211.0	96.35	206.0	95.81
15	202.0	96.19	211.0	96.35	206.0	95.81
18	202.0	96.19	210.0	95.89	205.0	95.35
21	201.0	95.71	209.0	95.43	205.0	95.35
24	201.0	95.71	208.0	94.98	204.0	94.88
27	201.0	95.71	207.0	94.52	204.0	94.88
30	200.0	95.24	206.0	94.06	203.0	94.42
33	199.8	95.14	206.0	94.06	203.0	94.42
36	199.6	95.05	206.0	94.06	203.0	94.42
39	199.2	94.86	206.0	94.06	202.0	93.95
42	199.0	94.76	205.0	93.61	202.0	93.95
45	198.7	94.62	204.0	93.15	201.0	93.49
48	198.4	94.48	203.0	92.69	201.0	93.49
51	198.1	94.33	203.0	92.69	200.0	93.02
54	197.8	94.19	202.0	92.24	199.9	92.98
57	197.6	94.10	202.0	92.24	199.4	92.74
60	197.4	94.00	202.0	92.24	198.8	92.47
63	197.1	93.86	202.0	92.24	198.4	92.28
66	196.9	93.76	202.0	92.24	197.9	92.05
69	196.7	93.67	202.0	92.24	197.5	91.86
72	196.5	93.57	201.0	91.78	197.0	91.63
75	196.2	93.43	200.0	91.32	196.6	91.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

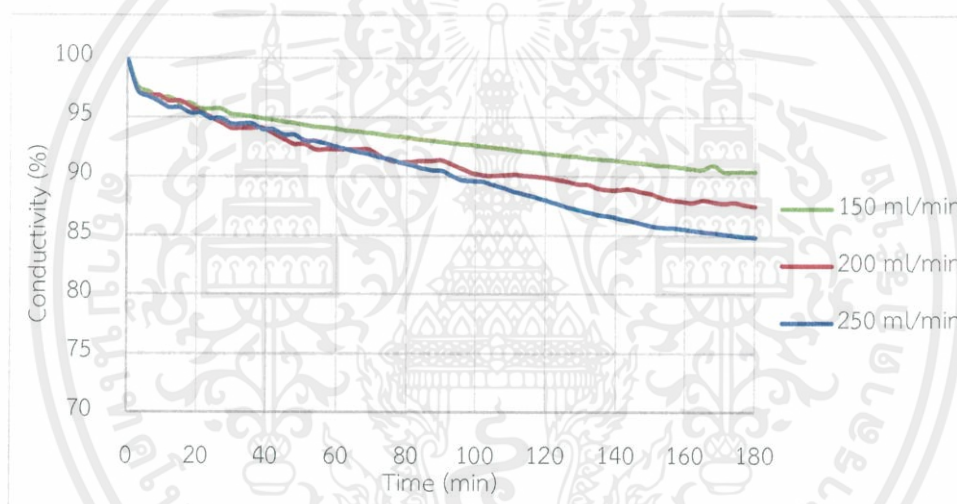
ตารางที่ ก 1.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
78	196.0	93.33	199.7	91.19	196.0	91.16
81	195.8	93.24	199.7	91.19	195.6	90.98
84	195.5	93.10	199.9	91.28	195.0	90.70
87	195.3	93.00	199.9	91.28	194.6	90.51
90	195.1	92.90	200.0	91.32	194.5	90.47
93	194.9	92.81	199.3	91.00	193.6	90.05
96	194.7	92.71	198.5	90.64	192.8	89.67
99	194.5	92.62	197.7	90.27	192.6	89.58
102	194.3	92.52	197.3	90.09	192.5	89.53
105	194.1	92.43	197.2	90.05	191.9	89.26
108	193.9	92.33	197.3	90.09	191.3	88.98
111	193.6	92.19	197.4	90.14	190.7	88.70
114	193.4	92.10	197.2	90.05	190.2	88.47
117	193.2	92.00	197.0	89.95	189.7	88.23
120	193.0	91.90	196.8	89.86	189.1	87.95
123	192.8	91.81	196.5	89.73	188.5	87.67
126	192.6	91.71	196.1	89.54	187.9	87.40
129	192.5	91.67	195.6	89.32	187.4	87.16
132	192.2	91.52	195.5	89.27	186.9	86.93
135	192.0	91.43	194.8	88.95	186.5	86.74
138	191.9	91.38	194.5	88.81	186.2	86.60
141	191.7	91.29	194.6	88.86	185.8	86.42
144	191.5	91.19	194.7	88.90	185.4	86.23
147	191.3	91.10	194.2	88.68	184.9	86.00
150	191.1	91.00	193.8	88.49	184.5	85.81
153	190.9	90.90	193.1	88.17	184.2	85.67
156	190.8	90.86	192.7	87.99	184.1	85.63
159	190.5	90.71	192.4	87.85	183.9	85.53
162	190.3	90.62	192.2	87.76	183.6	85.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 1.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
165	190.2	90.57	192.6	87.95	183.4	85.30
168	190.9	90.90	192.3	87.81	183.2	85.21
171	189.8	90.38	192.0	87.67	182.9	85.07
174	189.8	90.38	192.2	87.76	182.7	84.98
177	189.8	90.38	191.8	87.58	182.5	84.88
180	189.7	90.33	191.5	87.44	182.4	84.84



รูปที่ ก 1.1 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 0 โวลต์)

ตารางที่ ก 1.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.4 โวลต์

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
0	212.0	100.00	214.0	100.00	213.0	100.00
3	207.0	97.64	206.0	96.26	204.0	95.77
6	206.0	97.17	205.0	95.79	204.0	95.77
9	205.0	96.70	205.0	95.79	203.0	95.31
12	205.0	96.70	204.0	95.33	203.0	95.31
15	204.0	96.23	204.0	95.33	202.0	94.84
18	204.0	96.23	204.0	95.33	202.0	94.84
21	203.0	95.75	203.0	94.86	201.0	94.37
24	203.0	95.75	203.0	94.86	201.0	94.37
27	202.0	95.28	203.0	94.86	201.0	94.37
30	202.0	95.28	202.0	94.39	200.0	93.90
33	201.0	94.81	202.0	94.39	199.7	93.76
36	201.0	94.81	201.0	93.93	199.2	93.52
39	200.0	94.34	201.0	93.93	198.7	93.29
42	199.9	94.29	200.0	93.46	198.3	93.10
45	199.6	94.15	199.6	93.27	197.8	92.86
48	199.3	94.01	199.1	93.04	197.4	92.68
51	199.0	93.87	198.7	92.85	197.0	92.49
54	198.7	93.73	198.3	92.66	196.5	92.25
57	198.5	93.63	197.9	92.48	196.1	92.07
60	198.3	93.54	197.5	92.29	195.8	91.92
63	198.1	93.44	197.0	92.06	195.4	91.74
66	197.6	93.21	196.6	91.87	195.0	91.55
69	197.3	93.07	196.2	91.68	194.6	91.36
72	197.4	93.11	195.8	91.50	194.1	91.13
75	197.1	92.97	195.4	91.31	193.8	90.99
78	196.8	92.83	195.5	91.36	193.4	90.80
81	196.6	92.74	195.1	91.17	192.9	90.56
84	196.4	92.64	194.8	91.03	192.5	90.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

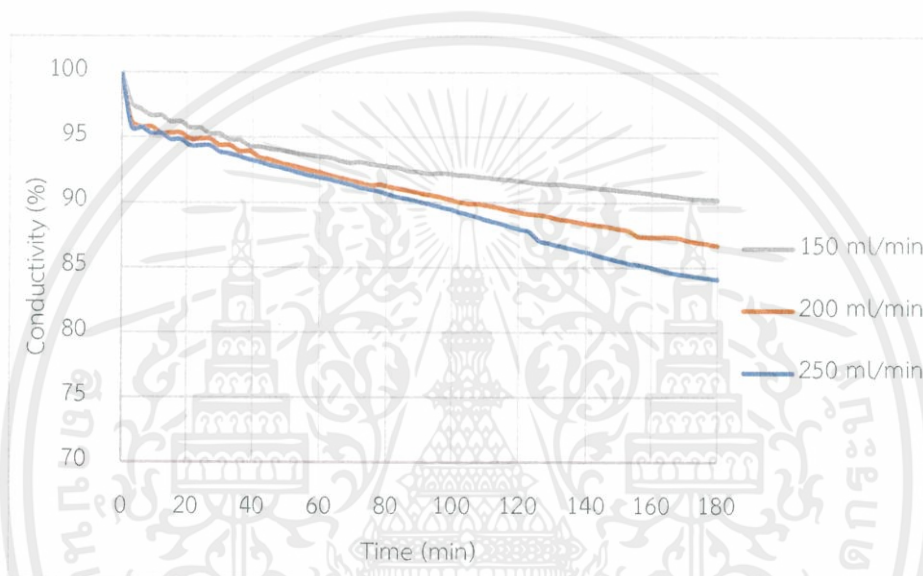
ตารางที่ ก 1.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.4 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
87	195.9	92.41	194.5	90.89	192.2	90.23
90	195.8	92.36	194.1	90.70	191.8	90.05
93	195.5	92.22	193.8	90.56	191.4	89.86
96	195.6	92.26	193.5	90.42	191.0	89.67
99	195.5	92.22	193.1	90.23	190.6	89.48
102	195.3	92.12	192.7	90.05	190.1	89.25
105	195.2	92.08	192.4	89.91	189.7	89.06
108	195.0	91.98	192.3	89.86	189.2	88.83
111	194.8	91.89	192.0	89.72	188.7	88.59
114	194.6	91.79	191.7	89.58	188.3	88.40
117	194.5	91.75	191.3	89.39	187.8	88.17
120	194.3	91.65	191.0	89.25	187.3	87.93
123	194.1	91.56	190.7	89.11	186.9	87.75
126	193.9	91.46	190.5	89.02	185.5	87.09
129	193.8	91.42	190.2	88.88	185.0	86.85
132	193.8	91.42	189.8	88.69	184.6	86.67
135	193.6	91.32	189.6	88.60	184.2	86.48
138	193.5	91.27	189.3	88.46	183.8	86.29
141	193.3	91.18	189.0	88.32	183.4	86.10
144	193.1	91.08	188.8	88.22	182.9	85.87
147	193.0	91.04	188.5	88.08	182.5	85.68
150	192.8	90.94	188.2	87.94	182.1	85.49
153	192.6	90.85	187.9	87.80	181.7	85.31
156	192.5	90.80	187.0	87.38	181.4	85.16
159	192.3	90.71	186.9	87.34	181.1	85.02
162	192.1	90.61	186.8	87.29	180.7	84.84
165	191.9	90.52	186.9	87.34	180.3	84.65
168	191.7	90.42	186.7	87.24	180.0	84.51
171	191.5	90.33	186.3	87.06	179.8	84.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 1.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.4 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
174	191.4	90.28	186.0	86.92	179.5	84.27
177	191.3	90.24	185.8	86.82	179.3	84.18
180	191.2	90.19	185.5	86.68	179.1	84.08



รูปที่ ก 1.2 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 0.4 โวลต์)

ตารางที่ ก 1.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.8 โวลต์

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
0	213.0	100.00	214.0	100.00	213.0	100.00
3	207.0	97.18	205.0	95.79	202.0	94.84
6	207.0	97.18	204.0	95.33	201.0	94.37
9	206.0	96.71	204.0	95.33	200.0	93.90
12	206.0	96.71	203.0	94.86	199.1	93.47
15	206.0	96.71	203.0	94.86	198.5	93.19
18	205.0	96.24	202.0	94.39	198.0	92.96
21	205.0	96.24	202.0	94.39	197.4	92.68
24	205.0	96.24	202.0	94.39	196.9	92.44
27	204.0	95.77	202.0	94.39	196.3	92.16
30	204.0	95.77	201.0	93.93	195.8	91.92
33	204.0	95.77	201.0	93.93	195.2	91.64
36	203.0	95.31	201.0	93.93	194.7	91.41
39	203.0	95.31	200.0	93.46	194.2	91.17
42	203.0	95.31	200.0	93.46	193.6	90.89
45	202.0	94.84	200.0	93.46	193.1	90.66
48	202.0	94.84	199.0	92.99	192.7	90.47
51	202.0	94.84	199.0	92.99	192.2	90.23
54	201.0	94.37	199.0	92.99	191.8	90.05
57	201.0	94.37	198.9	92.94	191.1	89.72
60	201.0	94.37	198.7	92.85	190.7	89.53
63	200.0	93.90	198.4	92.71	190.2	89.30
66	199.8	93.80	198.1	92.57	189.8	89.11
69	199.5	93.66	197.8	92.43	189.3	88.87
72	199.2	93.52	197.6	92.34	189.0	88.73
75	198.9	93.38	197.3	92.20	188.7	88.59
78	198.6	93.24	197.0	92.06	188.2	88.36
81	198.3	93.10	196.7	91.92	187.7	88.12
84	198.0	92.96	196.4	91.78	187.3	87.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

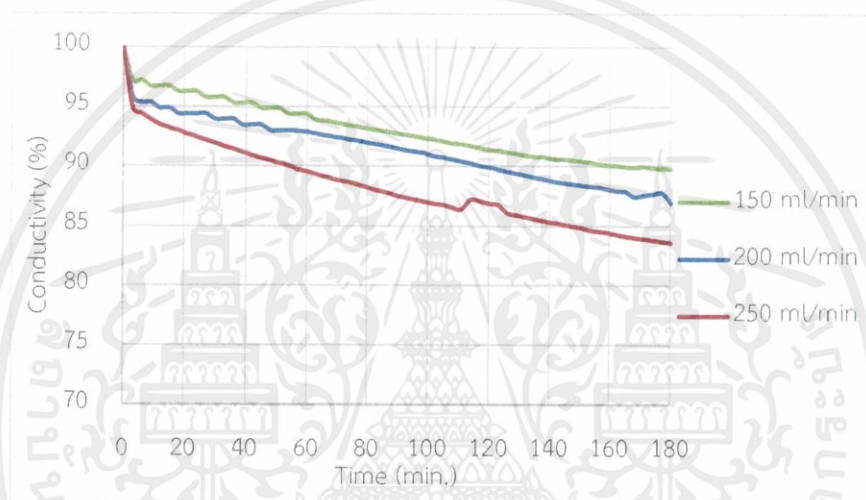
ตารางที่ ก 1.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.8 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)
87	197.8	92.86	196.1	91.64	186.9	87.75
90	197.5	92.72	195.8	91.50	186.4	87.51
93	197.2	92.58	195.4	91.31	186.0	87.32
96	197.0	92.49	195.2	91.21	185.7	87.18
99	196.7	92.35	194.9	91.07	185.3	87.00
102	196.4	92.21	194.4	90.84	185.0	86.85
105	196.1	92.07	194.1	90.70	184.7	86.71
108	195.8	91.92	193.8	90.56	184.3	86.53
111	195.6	91.83	193.4	90.37	184.0	86.38
114	195.3	91.69	193.1	90.23	185.7	87.18
117	194.9	91.50	192.7	90.05	185.4	87.04
120	194.6	91.36	192.4	89.91	185.0	86.85
123	194.4	91.27	192.0	89.72	184.7	86.71
126	194.2	91.17	191.6	89.53	183.3	86.06
129	193.9	91.03	191.3	89.39	182.9	85.87
132	193.6	90.89	190.9	89.21	182.6	85.73
135	193.4	90.80	190.6	89.07	182.2	85.54
138	193.3	90.75	190.2	88.88	181.9	85.40
141	193.0	90.61	189.9	88.74	181.6	85.26
144	192.9	90.56	189.6	88.60	181.3	85.12
147	192.8	90.52	189.4	88.50	181.0	84.98
150	192.6	90.42	189.2	88.41	180.7	84.84
153	192.4	90.33	189.0	88.32	180.3	84.65
156	192.1	90.19	188.8	88.22	180.0	84.51
159	191.9	90.09	188.5	88.08	179.8	84.41
162	191.8	90.05	188.2	87.94	179.5	84.27
165	191.6	89.95	188.0	87.85	179.1	84.08
168	191.5	89.91	187.1	87.43	178.9	83.99
171	191.6	89.95	187.4	87.57	178.7	83.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 1.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 0.8 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
174	191.4	89.86	187.6	87.66	178.5	83.80
177	191.3	89.81	187.8	87.76	178.2	83.66
180	191.2	89.77	186.0	86.92	178.0	83.57



รูปที่ ก 1.3 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 0.8 โวลต์)

ตารางที่ ก 1.4 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.0 โวลต์

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
0	218.0	100.00	215.0	100.00	205.0	100.00
3	205.0	94.04	197.5	91.86	188.3	91.85
6	204.0	93.58	196.0	91.16	186.4	90.93
9	203.0	93.12	195.5	90.93	184.9	90.20
12	202.0	92.66	195.3	90.84	182.1	88.83
15	201.0	92.20	194.6	90.51	180.9	88.24
18	201.0	92.20	193.6	90.05	179.9	87.76
21	200.0	91.74	192.7	89.63	179.0	87.32
24	199.3	91.42	192.0	89.30	178.2	86.93
27	198.7	91.15	191.4	89.02	177.5	86.59
30	198.1	90.87	190.8	88.74	176.9	86.29
33	197.8	90.73	190.2	88.47	176.4	86.05
36	197.1	90.41	189.5	88.14	176.0	85.85
39	196.7	90.23	188.9	87.86	175.4	85.56
42	196.2	90.00	188.8	87.81	174.9	85.32
45	195.8	89.82	189.0	87.91	174.1	84.93
48	195.3	89.59	189.2	88.00	173.5	84.63
51	195.0	89.45	189.2	88.00	173.0	84.39
54	194.8	89.36	188.8	87.81	172.6	84.20
57	194.4	89.17	188.2	87.53	172.3	84.05
60	193.8	88.90	187.4	87.16	171.8	83.80
63	193.3	88.67	186.7	86.84	171.4	83.61
66	192.9	88.49	185.8	86.42	170.9	83.37
69	192.5	88.30	185.1	86.09	170.2	83.02
72	191.9	88.03	184.3	85.72	169.7	82.78
75	191.5	87.84	184.4	85.77	169.2	82.54
78	191.0	87.61	184.6	85.86	168.5	82.20
81	190.6	87.43	184.8	85.95	168.0	81.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

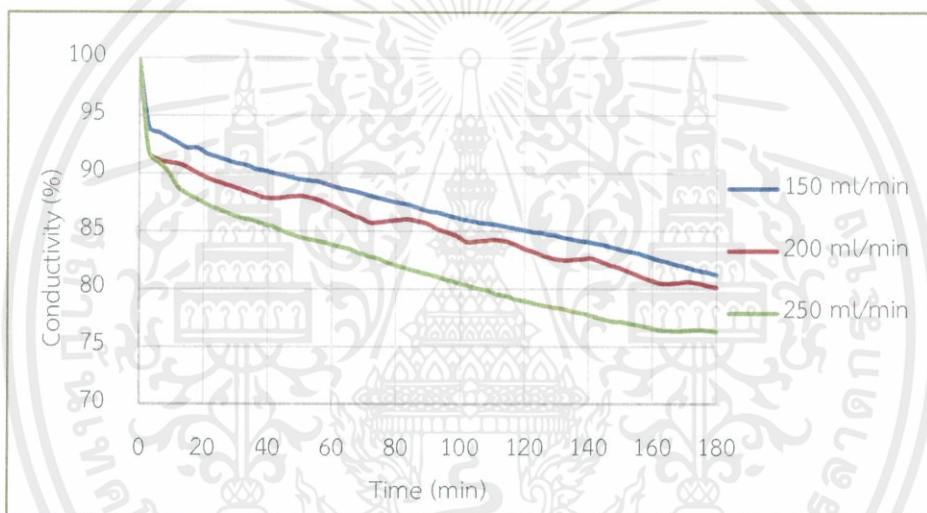
ตารางที่ ก 1.4 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.0 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
84	190.3	87.29	184.9	86.00	167.5	81.71
87	189.6	86.97	184.5	85.81	167.0	81.46
90	189.1	86.74	184.0	85.58	166.6	81.27
93	188.8	86.61	183.1	85.16	166.1	81.02
96	188.3	86.38	182.5	84.88	165.6	80.78
99	187.8	86.15	181.8	84.56	165.1	80.54
102	187.3	85.92	180.7	84.05	164.6	80.29
105	187.0	85.78	180.8	84.09	164.1	80.05
108	186.7	85.64	181.0	84.19	163.7	79.85
111	186.5	85.55	181.1	84.23	163.1	79.56
114	186.1	85.37	180.8	84.09	162.7	79.37
117	185.8	85.23	180.2	83.81	162.2	79.12
120	185.4	85.05	179.4	83.44	161.8	78.93
123	185.1	84.91	178.8	83.16	161.4	78.73
126	184.8	84.77	178.1	82.84	161.0	78.54
129	184.5	84.63	177.6	82.60	160.7	78.39
132	184.1	84.45	177.3	82.47	160.4	78.24
135	183.7	84.27	177.4	82.51	160.0	78.05
138	183.4	84.13	177.5	82.56	159.6	77.85
141	183.1	83.99	177.6	82.60	159.2	77.66
144	182.7	83.81	177.0	82.33	158.7	77.41
147	182.3	83.62	176.3	82.00	158.3	77.22
150	181.8	83.39	175.8	81.77	158.1	77.12
153	181.4	83.21	175.1	81.44	157.8	76.98
156	181.0	83.03	174.4	81.12	157.5	76.83
159	180.4	82.75	173.7	80.79	157.1	76.63
162	179.8	82.48	173.1	80.51	156.7	76.44
165	179.4	82.29	172.9	80.42	156.5	76.34
168	178.9	82.06	173.1	80.51	156.4	76.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 1.4 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.0 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
171	178.4	81.83	173.3	80.60	156.6	76.39
174	177.9	81.61	173.1	80.51	156.7	76.44
177	177.5	81.42	172.6	80.28	156.6	76.39
180	177.0	81.19	172.2	80.09	156.3	76.24



รูปที่ ก 1.4 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์)

ตารางที่ ก 1.5 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.2 โวลต์

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
0	213.0	100.00	214.0	100.00	209.0	100.00
3	206.0	96.71	206.0	96.26	201.0	96.17
6	205.0	96.24	206.0	96.26	200.0	95.69
9	205.0	96.24	205.0	95.79	199.4	95.41
12	205.0	96.24	205.0	95.79	198.6	95.02
15	205.0	96.24	205.0	95.79	198.4	94.93
18	205.0	96.24	205.0	95.79	198.1	94.78
21	204.0	95.77	204.0	95.33	197.4	94.45
24	204.0	95.77	204.0	95.33	196.9	94.21
27	204.0	95.77	203.0	94.86	196.6	94.07
30	204.0	95.77	203.0	94.86	196.4	93.97
33	204.0	95.77	204.0	95.33	196.2	93.88
36	204.0	95.77	203.0	94.86	195.9	93.73
39	203.0	95.31	202.0	94.39	195.7	93.64
42	203.0	95.31	202.0	94.39	195.3	93.44
45	203.0	95.31	202.0	94.39	194.9	93.25
48	203.0	95.31	202.0	94.39	194.6	93.11
51	202.0	94.84	202.0	94.39	194.4	93.01
54	202.0	94.84	202.0	94.39	194.1	92.87
57	203.0	95.31	201.0	93.93	193.9	92.78
60	203.0	95.31	202.0	94.39	193.5	92.58
63	202.0	94.84	201.0	93.93	193.3	92.49
66	202.0	94.84	201.0	93.93	192.9	92.30
69	202.0	94.84	201.0	93.93	192.7	92.20
72	202.0	94.84	201.0	93.93	192.3	92.01
75	202.0	94.84	200.0	93.46	192.0	91.87
78	202.0	94.84	200.0	93.46	191.8	91.77
81	202.0	94.84	200.0	93.46	191.4	91.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

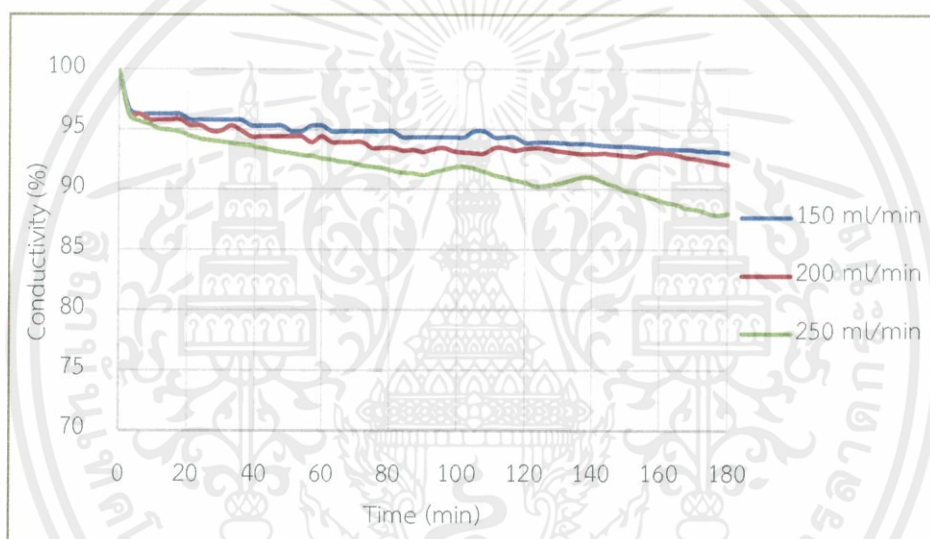
ตารางที่ ก 1.5 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.2 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 ml/min		200 ml/min		250 ml/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
84	201.0	94.37	199.5	93.22	191.0	91.39
87	201.0	94.37	199.6	93.27	190.9	91.34
90	201.0	94.37	199.3	93.13	190.6	91.20
93	201.0	94.37	199.7	93.32	191.0	91.39
96	201.0	94.37	200.0	93.46	191.5	91.63
99	201.0	94.37	199.4	93.18	191.9	91.82
102	201.0	94.37	199.2	93.08	192.1	91.91
105	202.0	94.84	199.1	93.04	191.7	91.72
108	202.0	94.84	199.0	92.99	191.2	91.48
111	201.0	94.37	200.0	93.46	190.6	91.20
114	201.0	94.37	200.0	93.46	190.2	91.00
117	201.0	94.37	199.5	93.22	189.7	90.77
120	200.0	93.90	199.8	93.36	189.3	90.57
123	200.0	93.90	200.0	93.46	188.7	90.29
126	200.0	93.90	199.9	93.41	188.8	90.33
129	200.0	93.90	199.5	93.22	189.0	90.43
132	199.9	93.85	199.3	93.13	189.4	90.62
135	199.8	93.80	199.0	92.99	189.9	90.86
138	199.8	93.80	198.9	92.94	190.3	91.05
141	199.6	93.71	198.9	92.94	190.0	90.91
144	199.5	93.66	199.0	92.99	189.3	90.57
147	199.4	93.62	198.8	92.90	188.7	90.29
150	199.4	93.62	198.6	92.80	187.9	89.90
153	199.3	93.57	198.5	92.76	187.5	89.71
156	199.1	93.47	198.9	92.94	186.9	89.43
159	199.0	93.43	199.2	93.08	186.4	89.19
162	198.8	93.33	199.0	92.99	185.8	88.90
165	198.8	93.33	198.7	92.85	185.5	88.76
168	198.8	93.33	198.3	92.66	184.8	88.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 1.5 ค่าการนำไฟฟ้า ที่สภาวะการทดลอง 1.2 โวลต์ (ต่อ)

Time(min)	150 mL/min		200 mL/min		250 mL/min	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
171	198.6	93.24	198.0	92.52	184.6	88.33
174	198.5	93.19	197.7	92.38	184.0	88.04
177	198.4	93.15	197.3	92.20	183.7	87.89
180	198.2	93.05	197.0	92.06	183.9	87.99



รูปที่ ก 1.5 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน (สภาวะการทดลอง ความต่างศักย์ 1.2 โวลต์)

2. ข้อมูลเมื่อเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์

ตารางที่ ก 2.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)
0	210.0	100.00	212.0	100.00	213.0	100.00	218.0	100.00	213.0	100.00
3	205.0	97.62	207.0	97.64	207.0	97.18	205.0	94.04	206.0	96.71
6	204.0	97.14	206.0	97.17	207.0	97.18	204.0	93.58	205.0	96.24
9	203.0	96.67	205.0	96.70	206.0	96.71	203.0	93.12	205.0	96.24
12	203.0	96.67	205.0	96.70	206.0	96.71	202.0	92.66	205.0	96.24
15	202.0	96.19	204.0	96.23	206.0	96.71	201.0	92.20	205.0	96.24
18	202.0	96.19	204.0	96.23	205.0	96.24	201.0	92.20	205.0	96.24
21	201.0	95.71	203.0	95.75	205.0	96.24	200.0	91.74	204.0	95.77
24	201.0	95.71	203.0	95.75	205.0	96.24	199.3	91.42	204.0	95.77
27	201.0	95.71	202.0	95.28	204.0	95.77	198.7	91.15	204.0	95.77
30	200.0	95.24	202.0	95.28	204.0	95.77	198.1	90.87	204.0	95.77
33	199.8	95.14	201.0	94.81	204.0	95.77	197.8	90.73	204.0	95.77
36	199.6	95.05	201.0	94.81	203.0	95.31	197.1	90.41	204.0	95.77
39	199.2	94.86	200.0	94.34	203.0	95.31	196.7	90.23	203.0	95.31
42	199.0	94.76	199.9	94.29	203.0	95.31	196.2	90.00	203.0	95.31
45	198.7	94.62	199.6	94.15	202.0	94.84	195.8	89.82	203.0	95.31
48	198.4	94.48	199.3	94.01	202.0	94.84	195.3	89.59	203.0	95.31
51	198.1	94.33	199.0	93.87	202.0	94.84	195.0	89.45	202.0	94.84
54	197.8	94.19	198.7	93.73	201.0	94.37	194.8	89.36	202.0	94.84
57	197.6	94.10	198.5	93.63	201.0	94.37	194.4	89.17	203.0	95.31
60	197.4	94.00	198.3	93.54	201.0	94.37	193.8	88.90	203.0	95.31
63	197.1	93.86	198.1	93.44	200.0	93.90	193.3	88.67	202.0	94.84
66	196.9	93.76	197.6	93.21	199.8	93.80	192.9	88.49	202.0	94.84
69	196.7	93.67	197.3	93.07	199.5	93.66	192.5	88.30	202.0	94.84
72	196.5	93.57	197.4	93.11	199.2	93.52	191.9	88.03	202.0	94.84
75	196.2	93.43	197.1	92.97	198.9	93.38	191.5	87.84	202.0	94.84
78	196.0	93.33	196.8	92.83	198.6	93.24	191.0	87.61	202.0	94.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

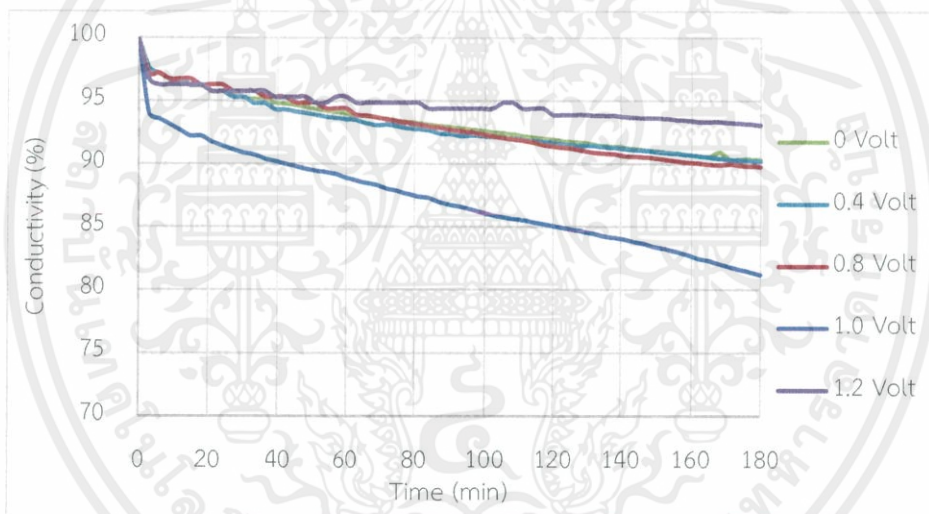
ตารางที่ ก 2.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที่ (ต่อ)

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)
81	195.8	93.24	196.6	92.74	198.3	93.10	190.6	87.43	202.0	94.84
84	195.5	93.10	196.4	92.64	198.0	92.96	190.3	87.29	201.0	94.37
87	195.3	93.00	195.9	92.41	197.8	92.86	189.6	86.97	201.0	94.37
90	195.1	92.90	195.8	92.36	197.5	92.72	189.1	86.74	201.0	94.37
93	194.9	92.81	195.5	92.22	197.2	92.58	188.8	86.61	201.0	94.37
96	194.7	92.71	195.6	92.26	197.0	92.49	188.3	86.38	201.0	94.37
99	194.5	92.62	195.5	92.22	196.7	92.35	187.8	86.15	201.0	94.37
102	194.3	92.52	195.3	92.12	196.4	92.21	187.3	85.92	201.0	94.37
105	194.1	92.43	195.2	92.08	196.1	92.07	187.0	85.78	202.0	94.84
108	193.9	92.33	195.0	91.98	195.8	91.92	186.7	85.64	202.0	94.84
111	193.6	92.19	194.8	91.89	195.6	91.83	186.5	85.55	201.0	94.37
114	193.4	92.10	194.6	91.79	195.3	91.69	186.1	85.37	201.0	94.37
117	193.2	92.00	194.5	91.75	194.9	91.50	185.8	85.23	201.0	94.37
120	193.0	91.90	194.3	91.65	194.6	91.36	185.4	85.05	200.0	93.90
123	192.8	91.81	194.1	91.56	194.4	91.27	185.1	84.91	200.0	93.90
126	192.6	91.71	193.9	91.46	194.2	91.17	184.8	84.77	200.0	93.90
129	192.5	91.67	193.8	91.42	193.9	91.03	184.5	84.63	200.0	93.90
132	192.2	91.52	193.8	91.42	193.6	90.89	184.1	84.45	199.9	93.85
135	192.0	91.43	193.6	91.32	193.4	90.80	183.7	84.27	199.8	93.80
138	191.9	91.38	193.5	91.27	193.3	90.75	183.4	84.13	199.8	93.80
141	191.7	91.29	193.3	91.18	193.0	90.61	183.1	83.99	199.6	93.71
144	191.5	91.19	193.1	91.08	192.9	90.56	182.7	83.81	199.5	93.66
147	191.3	91.10	193.0	91.04	192.8	90.52	182.3	83.62	199.4	93.62
150	191.1	91.00	192.8	90.94	192.6	90.42	181.8	83.39	199.4	93.62
153	190.9	90.90	192.6	90.85	192.4	90.33	181.4	83.21	199.3	93.57
156	190.8	90.86	192.5	90.80	192.1	90.19	181.0	83.03	199.1	93.47
159	190.5	90.71	192.3	90.71	191.9	90.09	180.4	82.75	199.0	93.43
162	190.3	90.62	192.1	90.61	191.8	90.05	179.8	82.48	198.8	93.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 2.1 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
165	190.2	90.57	191.9	90.52	191.6	89.95	179.4	82.29	198.8	93.33
168	190.9	90.90	191.7	90.42	191.5	89.91	178.9	82.06	198.8	93.33
171	189.8	90.38	191.5	90.33	191.6	89.95	178.4	81.83	198.6	93.24
174	189.8	90.38	191.4	90.28	191.4	89.86	177.9	81.61	198.5	93.19
177	189.8	90.38	191.3	90.24	191.3	89.81	177.5	81.42	198.4	93.15
180	189.7	90.33	191.2	90.19	191.2	89.77	177.0	81.19	198.2	93.05



รูปที่ ก 2.1 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน
(สภาวะการทดลอง อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที)

ตารางที่ ก 2.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
0	219.0	100.00	214.0	100.00	214.0	100.00	215.0	100.00	214.0	100.00
3	213.0	97.26	206.0	96.26	205.0	95.79	197.5	91.86	206.0	96.26
6	212.0	96.80	205.0	95.79	204.0	95.33	196.0	91.16	206.0	96.26
9	212.0	96.80	205.0	95.79	204.0	95.33	195.5	90.93	205.0	95.79
12	211.0	96.35	204.0	95.33	203.0	94.86	195.3	90.84	205.0	95.79
15	211.0	96.35	204.0	95.33	203.0	94.86	194.6	90.51	205.0	95.79
18	210.0	95.89	204.0	95.33	202.0	94.39	193.6	90.05	205.0	95.79
21	209.0	95.43	203.0	94.86	202.0	94.39	192.7	89.63	204.0	95.33
24	208.0	94.98	203.0	94.86	202.0	94.39	192.0	89.30	204.0	95.33
27	207.0	94.52	203.0	94.86	202.0	94.39	191.4	89.02	203.0	94.86
30	206.0	94.06	202.0	94.39	201.0	93.93	190.8	88.74	203.0	94.86
33	206.0	94.06	202.0	94.39	201.0	93.93	190.2	88.47	204.0	95.33
36	206.0	94.06	201.0	93.93	201.0	93.93	189.5	88.14	203.0	94.86
39	206.0	94.06	201.0	93.93	200.0	93.46	188.9	87.86	202.0	94.39
42	205.0	93.61	200.0	93.46	200.0	93.46	188.8	87.81	202.0	94.39
45	204.0	93.15	199.6	93.27	200.0	93.46	189.0	87.91	202.0	94.39
48	203.0	92.69	199.1	93.04	199.0	92.99	189.2	88.00	202.0	94.39
51	203.0	92.69	198.7	92.85	199.0	92.99	189.2	88.00	202.0	94.39
54	202.0	92.24	198.3	92.66	199.0	92.99	188.8	87.81	202.0	94.39
57	202.0	92.24	197.9	92.48	198.9	92.94	188.2	87.53	201.0	93.93
60	202.0	92.24	197.5	92.29	198.7	92.85	187.4	87.16	202.0	94.39
63	202.0	92.24	197.0	92.06	198.4	92.71	186.7	86.84	201.0	93.93
66	202.0	92.24	196.6	91.87	198.1	92.57	185.8	86.42	201.0	93.93
69	202.0	92.24	196.2	91.68	197.8	92.43	185.1	86.09	201.0	93.93
72	201.0	91.78	195.8	91.50	197.6	92.34	184.3	85.72	201.0	93.93
75	200.0	91.32	195.4	91.31	197.3	92.20	184.4	85.77	200.0	93.46
78	199.7	91.19	195.5	91.36	197.0	92.06	184.6	85.86	200.0	93.46
81	199.7	91.19	195.1	91.17	196.7	91.92	184.8	85.95	200.0	93.46
84	199.9	91.28	194.8	91.03	196.4	91.78	184.9	86.00	199.5	93.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

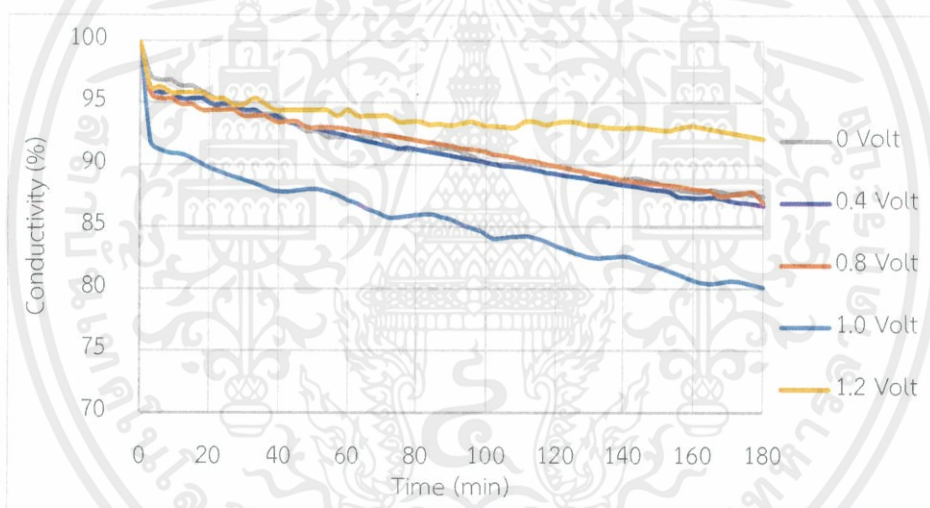
ตารางที่ ก 2.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)
87	199.9	91.28	194.5	90.89	196.1	91.64	184.5	85.81	199.6	93.27
90	200.0	91.32	194.1	90.70	195.8	91.50	184.0	85.58	199.3	93.13
93	199.3	91.00	193.8	90.56	195.4	91.31	183.1	85.16	199.7	93.32
96	198.5	90.64	193.5	90.42	195.2	91.21	182.5	84.88	200.0	93.46
99	197.7	90.27	193.1	90.23	194.9	91.07	181.8	84.56	199.4	93.18
102	197.3	90.09	192.7	90.05	194.4	90.84	180.7	84.05	199.2	93.08
105	197.2	90.05	192.4	89.91	194.1	90.70	180.8	84.09	199.1	93.04
108	197.3	90.09	192.3	89.86	193.8	90.56	181.0	84.19	199.0	92.99
111	197.4	90.14	192.0	89.72	193.4	90.37	181.1	84.23	200.0	93.46
114	197.2	90.05	191.7	89.58	193.1	90.23	180.8	84.09	200.0	93.46
117	197.0	89.95	191.3	89.39	192.7	90.05	180.2	83.81	199.5	93.22
120	196.8	89.86	191.0	89.25	192.4	89.91	179.4	83.44	199.8	93.36
123	196.5	89.73	190.7	89.11	192.0	89.72	178.8	83.16	200.0	93.46
126	196.1	89.54	190.5	89.02	191.6	89.53	178.1	82.84	199.9	93.41
129	195.6	89.32	190.2	88.88	191.3	89.39	177.6	82.60	199.5	93.22
132	195.5	89.27	189.8	88.69	190.9	89.21	177.3	82.47	199.3	93.13
135	194.8	88.95	189.6	88.60	190.6	89.07	177.4	82.51	199.0	92.99
138	194.5	88.81	189.3	88.46	190.2	88.88	177.5	82.56	198.9	92.94
141	194.6	88.86	189.0	88.32	189.9	88.74	177.6	82.60	198.9	92.94
144	194.7	88.90	188.8	88.22	189.6	88.60	177.0	82.33	199.0	92.99
147	194.2	88.68	188.5	88.08	189.4	88.50	176.3	82.00	198.8	92.90
150	193.8	88.49	188.2	87.94	189.2	88.41	175.8	81.77	198.6	92.80
153	193.1	88.17	187.9	87.80	189.0	88.32	175.1	81.44	198.5	92.76
156	192.7	87.99	187.0	87.38	188.8	88.22	174.4	81.12	198.9	92.94
159	192.4	87.85	186.9	87.34	188.5	88.08	173.7	80.79	199.2	93.08
162	192.2	87.76	186.8	87.29	188.2	87.94	173.1	80.51	199.0	92.99
165	192.6	87.95	186.9	87.34	188.0	87.85	172.9	80.42	198.7	92.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 2.2 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)	($\mu\text{s/cm}$)	(%)
168	192.3	87.81	186.7	87.24	187.1	87.43	173.1	80.51	198.3	92.66
171	192.0	87.67	186.3	87.06	187.4	87.57	173.3	80.60	198.0	92.52
174	192.2	87.76	186.0	86.92	187.6	87.66	173.1	80.51	197.7	92.38
177	191.8	87.58	185.8	86.82	187.8	87.76	172.6	80.28	197.3	92.20
180	191.5	87.44	185.5	86.68	186.0	86.92	172.2	80.09	197.0	92.06



รูปที่ ก 2.2 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน
(สภาวะการทดลอง อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที)

ตารางที่ ก.2.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 250 มิลลิเมตร/นาทีก

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)
0	213.0	100.00	213.0	100.00	213.0	100.00	205.0	100.00	209.0	100.00
3	209.0	98.12	204.0	95.77	202.0	94.84	188.3	91.85	201.0	96.17
6	208.0	97.65	204.0	95.77	201.0	94.37	186.4	90.93	200.0	95.69
9	207.0	97.18	203.0	95.31	200.0	93.90	184.9	90.20	199.4	95.41
12	206.0	96.71	203.0	95.31	199.1	93.47	182.1	88.83	198.6	95.02
15	206.0	96.71	202.0	94.84	198.5	93.19	180.9	88.24	198.4	94.93
18	205.0	96.24	202.0	94.84	198.0	92.96	179.9	87.76	198.1	94.78
21	205.0	96.24	201.0	94.37	197.4	92.68	179.0	87.32	197.4	94.45
24	204.0	95.77	201.0	94.37	196.9	92.44	178.2	86.93	196.9	94.21
27	204.0	95.77	201.0	94.37	196.3	92.16	177.5	86.59	196.6	94.07
30	203.0	95.31	200.0	93.90	195.8	91.92	176.9	86.29	196.4	93.97
33	203.0	95.31	199.7	93.76	195.2	91.64	176.4	86.05	196.2	93.88
36	203.0	95.31	199.2	93.52	194.7	91.41	176.0	85.85	195.9	93.73
39	202.0	94.84	198.7	93.29	194.2	91.17	175.4	85.56	195.7	93.64
42	202.0	94.84	198.3	93.10	193.6	90.89	174.9	85.32	195.3	93.44
45	201.0	94.37	197.8	92.86	193.1	90.66	174.1	84.93	194.9	93.25
48	201.0	94.37	197.4	92.68	192.7	90.47	173.5	84.63	194.6	93.11
51	200.0	93.90	197.0	92.49	192.2	90.23	173.0	84.39	194.4	93.01
54	199.9	93.85	196.5	92.25	191.8	90.05	172.6	84.20	194.1	92.87
57	199.4	93.62	196.1	92.07	191.1	89.72	172.3	84.05	193.9	92.78
60	198.8	93.33	195.8	91.92	190.7	89.53	171.8	83.80	193.5	92.58
63	198.4	93.15	195.4	91.74	190.2	89.30	171.4	83.61	193.3	92.49
66	197.9	92.91	195.0	91.55	189.8	89.11	170.9	83.37	192.9	92.30
69	197.5	92.72	194.6	91.36	189.3	88.87	170.2	83.02	192.7	92.20
72	197.0	92.49	194.1	91.13	189.0	88.73	169.7	82.78	192.3	92.01
75	196.6	92.30	193.8	90.99	188.7	88.59	169.2	82.54	192.0	91.87
78	196.0	92.02	193.4	90.80	188.2	88.36	168.5	82.20	191.8	91.77
81	195.6	91.83	192.9	90.56	187.7	88.12	168.0	81.95	191.4	91.58
84	195.0	91.55	192.5	90.38	187.3	87.93	167.5	81.71	191.0	91.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

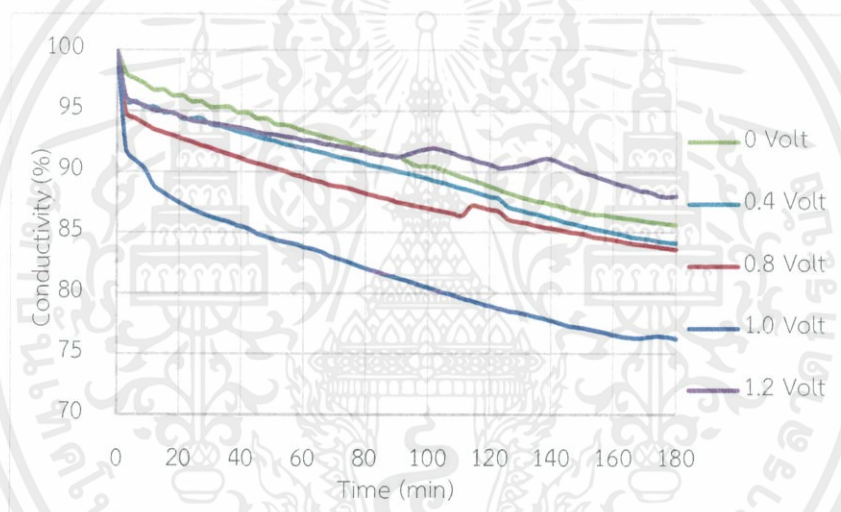
ตารางที่ ก 2.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 250 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)
87	194.6	91.36	192.2	90.23	186.9	87.75	167.0	81.46	190.9	91.34
90	194.5	91.31	191.8	90.05	186.4	87.51	166.6	81.27	190.6	91.20
93	193.6	90.89	191.4	89.86	186.0	87.32	166.1	81.02	191.0	91.39
96	192.8	90.52	191.0	89.67	185.7	87.18	165.6	80.78	191.5	91.63
99	192.6	90.42	190.6	89.48	185.3	87.00	165.1	80.54	191.9	91.82
102	192.5	90.38	190.1	89.25	185.0	86.85	164.6	80.29	192.1	91.91
105	191.9	90.09	189.7	89.06	184.7	86.71	164.1	80.05	191.7	91.72
108	191.3	89.81	189.2	88.83	184.3	86.53	163.7	79.85	191.2	91.48
111	190.7	89.53	188.7	88.59	184.0	86.38	163.1	79.56	190.6	91.20
114	190.2	89.30	188.3	88.40	185.7	87.18	162.7	79.37	190.2	91.00
117	189.7	89.06	187.8	88.17	185.4	87.04	162.2	79.12	189.7	90.77
120	189.1	88.78	187.3	87.93	185.0	86.85	161.8	78.93	189.3	90.57
123	188.5	88.50	186.9	87.75	184.7	86.71	161.4	78.73	188.7	90.29
126	187.9	88.22	185.5	87.09	183.3	86.06	161.0	78.54	188.8	90.33
129	187.4	87.98	185.0	86.85	182.9	85.87	160.7	78.39	189.0	90.43
132	186.9	87.75	184.6	86.67	182.6	85.73	160.4	78.24	189.4	90.62
135	186.5	87.56	184.2	86.48	182.2	85.54	160.0	78.05	189.9	90.86
138	186.2	87.42	183.8	86.29	181.9	85.40	159.6	77.85	190.3	91.05
141	185.8	87.23	183.4	86.10	181.6	85.26	159.2	77.66	190.0	90.91
144	185.4	87.04	182.9	85.87	181.3	85.12	158.7	77.41	189.3	90.57
147	184.9	86.81	182.5	85.68	181.0	84.98	158.3	77.22	188.7	90.29
150	184.5	86.62	182.1	85.49	180.7	84.84	158.1	77.12	187.9	89.90
153	184.2	86.48	181.7	85.31	180.3	84.65	157.8	76.98	187.5	89.71
156	184.1	86.43	181.4	85.16	180.0	84.51	157.5	76.83	186.9	89.43
159	183.9	86.34	181.1	85.02	179.8	84.41	157.1	76.63	186.4	89.19
162	183.6	86.20	180.7	84.84	179.5	84.27	156.7	76.44	185.8	88.90
165	183.4	86.10	180.3	84.65	179.1	84.08	156.5	76.34	185.5	88.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 2.3 ค่าการนำไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 250 มิลลิลิตร/นาที (ต่อ)

Time (min)	0 volt		0.4 volt		0.8 volt		1.0 volt		1.2 volt	
	Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity		Conductivity	
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(%)
168	183.2	86.01	180.0	84.51	178.9	83.99	156.4	76.29	184.8	88.42
171	182.9	85.87	179.8	84.41	178.7	83.90	156.6	76.39	184.6	88.33
174	182.7	85.77	179.5	84.27	178.5	83.80	156.7	76.44	184.0	88.04
177	182.5	85.68	179.3	84.18	178.2	83.66	156.6	76.39	183.7	87.89
180	182.4	85.63	179.1	84.08	178.0	83.57	156.3	76.24	183.9	87.99



รูปที่ ก 2.3 การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน
(สภาวะการทดลอง อัตราการไหล 250 มิลลิลิตร/นาที)

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

1. คำนวณเพื่อเตรียมสารละลาย

- เตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 1 มิลลิโมลาร์ (เพื่อใช้ในการทดลอง)

มวลโมเลกุลของ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 249.5$ กรัม

สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์

ใช้คอปเปอร์ซัลเฟต 249.5 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร

สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

คอปเปอร์ซัลเฟต $(0.001 \times 249.5) / 1 = 0.2495$ กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร

- เตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0.1 – 0.9 มิลลิโมลาร์ (เพื่อใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน)

ตัวอย่าง จากสูตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(1 \text{ mM})(V_1) = (0.9 \text{ mM})(100 \text{ mL})$$

$$V_1 = 90 \text{ mL}$$

ดังนั้น ในการเตรียมสารละลาย 0.9 มิลลิโมลาร์ จะต้องใช้สารละลาย 1 มิลลิโมลาร์ 90 มิลลิลิตร และเจือจางจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร

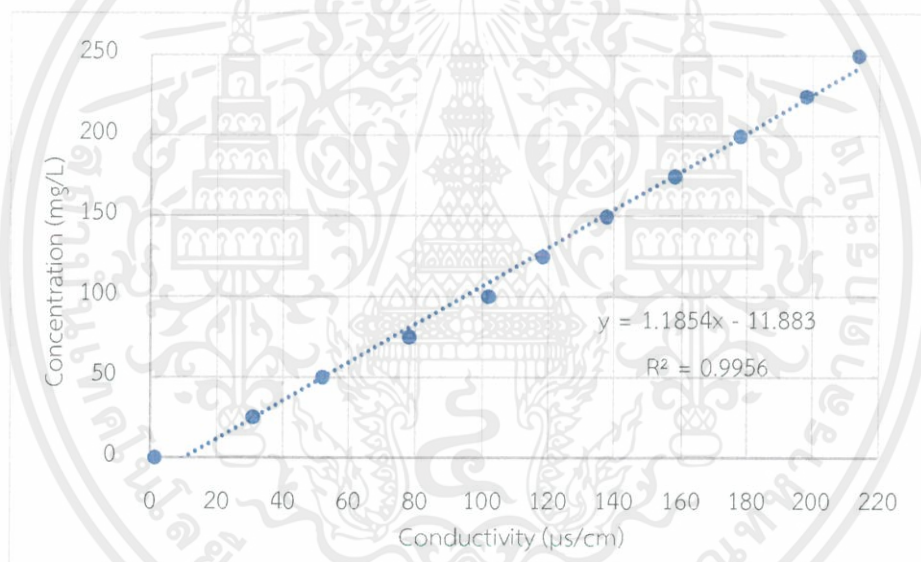
2. สร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

ตารางที่ ข 2.1 ค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0 – 1 มิลลิโมลาร์

Concentration		Conductivity
(mM)	(mg/L)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	249.5	214
0.9	224.55	198.1
0.8	199.6	177.7
0.7	174.65	157.9
0.6	149.7	137.8
0.5	124.75	118.3

ตารางที่ ข 2.1 ค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0-1 มิลลิโมลาร์ (ต่อ)

Concentration		Conductivity
(mM)	(mg/L)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)
0.4	99.8	101.8
0.3	74.85	78.2
0.2	49.9	52
0.1	24.95	30.7
0	0	1.4



รูปที่ ข 2.1 กราฟมาตรฐานค่าการนำไฟฟ้า

จากรูปที่ ข 2.1 จะได้สมการความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงคือ $y = 1.1854x - 11.883$

โดยที่ y คือ ความเข้มข้น (mg/L)

x คือ ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

3. การคำนวณปริมาณไอออนที่ถูกกำจัด

ตัวอย่าง ที่สภาวะการทดลอง อัตราการไหล 250 มิลลิลิตร/นาที และความต่างศักย์ 1.0 โวลต์

นาที่ที่ 0 วัดค่าการนำไฟฟ้าได้ 205 $\mu\text{s}/\text{cm}$

คิดเป็นความเข้มข้นจาก สมการ $y = 1.1854x - 11.883$

แทนค่าจะได้ $y = 231.124 \text{ mg}/\text{l}$

ในการทดลองใช้สารละลายปริมาตร 100 ml จะมีสารอยู่ $(100 \times 231.124) / 1000 = 23.1124 \text{ mg}$

นาที่ที่ 180 วัดค่าการนำไฟฟ้าได้ 156.3 $\mu\text{s}/\text{cm}$

คิดเป็นความเข้มข้นจาก สมการ $y = 1.1854x - 11.883$

แทนค่าจะได้ $y = 173.395 \text{ mg}/\text{l}$

ในการทดลองใช้สารละลายปริมาตร 100 ml จะมีสารอยู่ $(100 \times 173.395) / 1000 = 17.3395 \text{ mg}$

สภาวะการทดลองนี้ กำจัดไอออนได้ $23.1124 - 17.3395 = 5.7729 \text{ mg}$

ขี้คาร์บอนแต่ละชั่วโมง ใช้ผงถ่านกัมมันต์ 2 กรัม

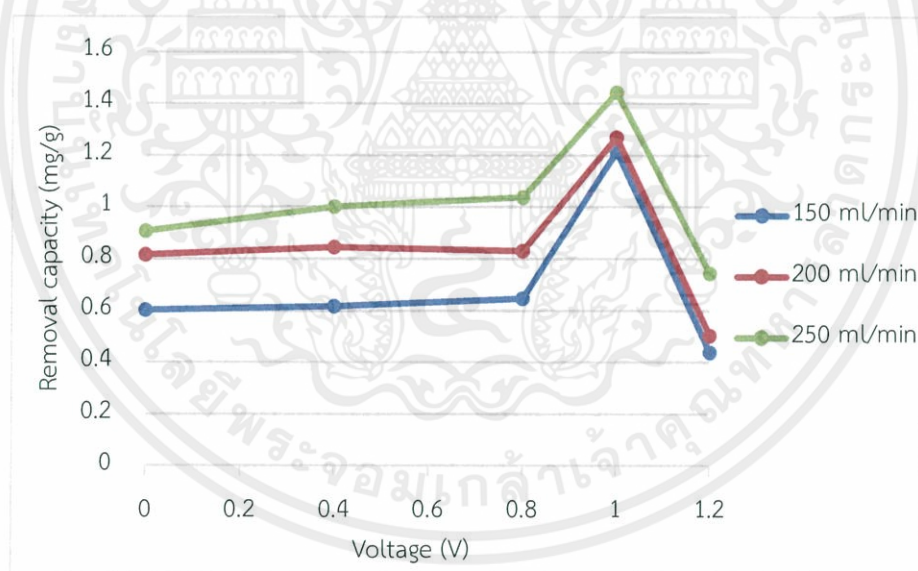
สรุปว่าที่สภาวะการทดลองนี้สามารถกำจัดไอออนได้ $5.7729 / 4 = 1.4432 \text{ mg}/\text{g}$

ตารางที่ ข 3.1 ปริมาณคอปเปอร์ที่ถูกกำจัดออกที่สภาวะต่าง ๆ

Flow rate (ml/min)	Voltage (V)	Removal capacity (mg/g)
150	0	0.6016
	0.4	0.6164
	0.8	0.6460
	1	1.2150
	1.2	0.4386
200	0	0.8150
	0.4	0.8446
	0.8	0.8298

ตารางที่ ข 3.1 ปริมาณคอปเปอร์ที่ถูกกำจัดออกที่สภาวะต่าง ๆ (ต่อ)

Flow rate (mL/min)	Voltage (V)	Removal capacity (mg/g)
200	1	1.2684
	1.2	0.5038
250	0	0.9068
	0.4	1.0017
	0.8	1.0372
	1	1.4432
	1.2	0.7438

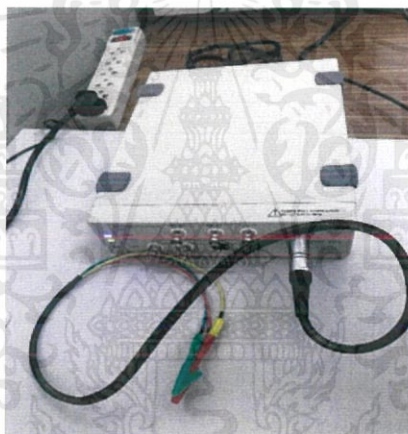


รูปที่ ข 3.1 ปริมาณคอปเปอร์ที่ถูกกำจัดออกที่สภาวะต่าง ๆ

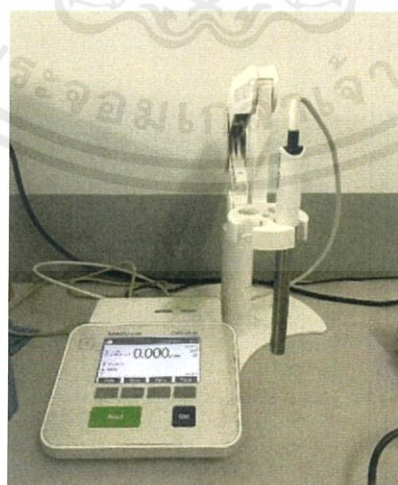
ภาคผนวก ค.
เครื่องมือและอุปกรณ์



รูปที่ ค 1.1 หน่วยคาปาซิทีฟ ได้ออโนเซชั่น (CDI unit)



รูปที่ ค 1.2 เครื่องโพเทนชิออสแตท (Potentiostat)



รูปที่ ค 1.3 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

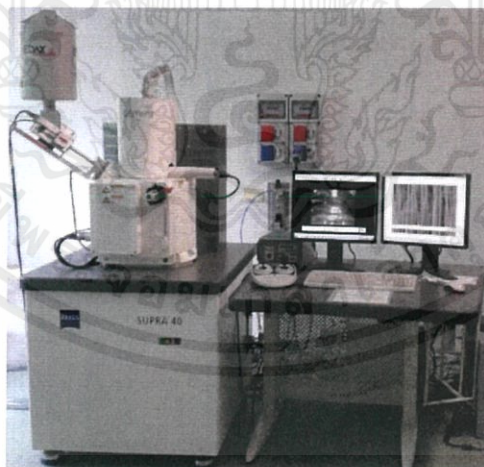
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค 1.4 ปัมป์สุบจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (Peristaltic pump)



รูปที่ ค 1.5 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer)



รูปที่ ค 1.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscopy, SEM) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้