

การผลิตน้ำจืดจากน้ำเค็มด้วยกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำโดยความต่างศักย์ไฟฟ้า



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Water desalination by capacitive deionization method

Yanisa Netwong
Datchanee Tongma

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

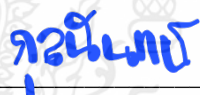
ปริญญานิพนธ์เรื่อง การผลิตน้ำจืดจากน้ำเค็มด้วยกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำโดย
ความต่างศักย์ไฟฟ้า
โดย นางสาวญาณิศา เนตรวงษ์
นางสาวดรรรชนี ทองมา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์
ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์)


กรรมการ
(ผศ.ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา)


กรรมการ
(รศ.ดร.กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การผลิตน้ำจืดจากน้ำเค็มด้วยกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำโดยความต่างศักย์ไฟฟ้า
โดย	นางสาวญาณิศา เนตรวงษ์ นางสาวดรรรชนี ทองมา
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนน้ำจืดกลายเป็นปัญหาระดับโลก กระบวนการแยกเกลือจากน้ำทะเลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการตอบสนองต่อความต้องการเพิ่มทรัพยากรน้ำจืดของมนุษย์ Capacitive Deionization (CDI) เป็นเทคโนโลยีทางเลือกในการแยกเกลือออกจากน้ำด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานต่ำ มีต้นทุนต่ำและสามารถหาซื้อได้ง่าย ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดและศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบ CDI Stack รวมไปถึงการจัดเตรียมอิเล็กโทรดทั้งด้านแคโทดและแอโนด ได้แก่คาร์บอนอิเล็กโทรด และคาร์บอนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยซิลเวอร์ ตามลำดับ โดยผสมผงถ่านกัมมันต์กับสารยึดเกาะพอลิเมอร์ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) เพื่อให้อิเล็กโทรดสามารถยึดเกาะกันได้ดี หลังจากนั้นนำไปเคลือบด้วยซิลเวอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ และเพิ่มประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด ศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการพิจารณาภายใต้ความต่างศักย์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง และประเมินค่าจากความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) เมื่อเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง พบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V มีประสิทธิภาพในการแยกไอออนออกจากน้ำมากที่สุด โดยมีค่าความสามารถการดูดซับ $2,404.20 \text{ mg}_{\text{salt}}/\text{g}_{\text{carbon}}$ ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ดีสำหรับกระบวนการแยกเกลือออกจากน้ำ

Report Title	Water desalination by capacitive deionization method
By	Yanisa Netwong Datchanee Tongma
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2022
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Patthranit Wongpromrat

ABSTRACT

Due to the global problem of freshwater scarcity, the process of desalinating seawater has become crucial in responding to the increasing in demand for freshwater resources. Capacitive Deionization (CDI) is an alternative technology for desalination, via electrochemical sorption and desorption of ions. Among desalination technologies, CDI has been attracted interest as an energy-efficient and cost-effective technology. As a result, studying the efficiencies of electrodes and the influence of different working voltages utilized in the process are significant interest. In this research, a CDI stack was designed, including the preparation of both cathode and anode, which were carbon electrode and carbon electrode coated with silver, respectively. The mixture of activated carbon powder and PVDF polymer was used to improve the adhesion of the electrodes. After that, coat electrodes with silver to enhance the adsorption capacity and the efficiency of electrodes. The influence of different electrical potentials used in the process was evaluated by considering the adsorption capacity under various applied voltages. The results showed that the working voltage of 0.7 V exhibited the highest efficiency in ion removal from water, with an adsorption capacity of $2,404.20 \text{ mg}_{\text{salt}}/\text{g}_{\text{carbon}}$, which is a promising trend for the desalination process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จไปด้วยดีโดยได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์ ที่คอยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาในปริญญาานิพนธ์
ฉบับนี้ จึงทำให้การทำงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างราบรื่นและสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบังที่ให้คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ทางวิศวกรรม อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำให้
ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่วิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและให้
คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัวของผู้วิจัยที่คอยสนับสนุนในด้านการศึกษา รวมทั้ง
เพื่อนภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านและผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ในที่นี้ ที่คอยช่วยเหลือและให้
กำลังใจซึ่งทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ญาณิศา เนตรวงษ์
ดรชนี ทองมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

C_i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย	mg/l
C_t	ความเข้มข้นขาออกของสารละลาย ณ เวลาใดๆ	mg/l
E^0	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยารีดักชัน	V
EFF	ประสิทธิภาพการดูดซับ	%
I	กระแสไฟฟ้า	A
M	ความเข้มข้นของสารละลาย	mol/l
M_{carbon}	มวลของตัวดูดซับ	g
Q	ความสามารถการดูดซับ	mg _{salt} /g _{carbon}
q	ปริมาณไฟฟ้า	C
t	เวลา	s
t_{ads}	เวลาในการดูดซับ	s
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	V
\dot{V}	อัตราการไหลของสารละลาย	ml/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สัญลักษณ์.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ถ่านกัมมันต์.....	3
2.1.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	3
2.2 หลักการของ Capacitive deionization (CDI).....	4
2.2.1 รูปแบบของ Capacitive deionization (CDI).....	5
2.3 กลไกการดูดซับ (Mechanism of adsorption).....	6
2.4 การออกแบบการทดลอง.....	7
2.4.1 การทำแบบ Single-pass (SP-Method).....	7
2.5 Faradaic reaction.....	7
2.5.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด (Anodic oxidation reactions).....	7
2.5.2 ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด (Cathodic reduction reactions).....	8
2.6 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law).....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 น้ำหนักสมมูล (Equivalent weight, eq. wt.).....	9
2.7 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.7.1 ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity, Q).....	9
2.7.2 ประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorption efficiency, EFF).....	10
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง.....	14
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	15
3.3.1 การออกแบบ CDI stack.....	15
3.3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน.....	16
3.3.3 การเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรด [12].....	17
3.3.4 การเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยซิลเวอร์.....	17
3.3.5 การเตรียมอัตราการไหลที่เหมาะสม.....	17
3.3.6 การทดลอง Capacitive deionization แบบ Single pass-mode (SP-method)..	18
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	20
4.1 ค่าการนำไฟฟ้าสำหรับสารละลาย.....	20
4.2 วัดอัตราการไหล.....	21
4.3 ศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด.....	21
4.4 ศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ที่ใช้ในการกำจัดไอออนออกจากน้ำ.....	24
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	27
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	27
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	27
เอกสารอ้างอิง.....	29
ภาคผนวก.....	31
ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการทำอิเล็กโทรด.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราการใช้ไฟ.....	21
ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ.....	23
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ.....	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์.....	3
รูปที่ 2.2 แผนผังจำลองของ Capacitive deionization (CDI)	5
รูปที่ 2.3 (ก) แบบจำลองไอออนและประจุที่สะสมอยู่ใน Electrical double layers (EDLs) (ข) แบบจำลองรูพรุนที่อยู่ภายในอิเล็กโทรด	5
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปแบบของ Capacitive deionization (CDI)	6
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนตัวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ในกระบวนการดูดซับ	6
รูปที่ 2.6 การทำแบบ Single-pass (SP-Method)	7
รูปที่ 2.7 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนสำหรับอิเล็กโทรด	11
รูปที่ 2.8 การแปรผันของการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.002 M.....	11
รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดไอออน	12
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการดูดซับและ (ก) ความต่างศักย์ที่ใช้ (ข) ความเข้มข้น ของสารละลายขาเข้า ใน CDI.....	12
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้และ (ก) ความต่างศักย์ (ข) ความเข้มข้นของสารละลาย ขาเข้าที่ใช้ใน CDI	13
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างภาพถ่าย 2 มิติสำหรับแผ่นอะคริลิกและแผ่นซิลิโคน สร้างโดยโปรแกรม AutoCAD	15
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างภาพ 2 มิติ ส่วนประกอบของ CDI stack.....	16
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของ CDI stack	16
รูปที่ 3.4 CDI stack.....	18
รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ .	20
รูปที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ 0.1 V	22
รูปที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ 0.4 V	22
รูปที่ 4.4 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ 0.7 V	23
รูปที่ 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V ของกระบวนการดูดซับในรอบที่ 1.....	24
รูปที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V ของกระบวนการดูดซับในรอบที่ 2.....	25
รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V ของกระบวนการดูดซับในรอบที่ 3.....	25
รูปที่ 4.8 ผลรวมค่าความสามารถการดูดซับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก ไม่ว่าจะเป็นด้านอุปโภค บริโภค อุตสาหกรรม การคมนาคม หรือการเกษตร โดยปริมาณน้ำบนโลกโดยเฉลี่ยแล้วมีน้ำทะเลหรือน้ำเค็มอยู่ร้อยละ 97 และมีน้ำจืดอยู่เพียงร้อยละ 3 เท่านั้น ในน้ำจืดร้อยละ 3 นั้น จะแบ่งออกเป็นน้ำแข็งตามขั้วโลก น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล [1]

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) ในปัจจุบัน ส่งผลให้อุณหภูมิของพื้นผิวโลกและระดับน้ำทะเลเฉลี่ยทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้นจากการละลายของธารน้ำแข็ง และส่งผลกระทบต่อวัฏจักรของน้ำบนโลก ปัจจุบันมีจำนวนประชากรโลกมากขึ้น จึงมีความต้องการใช้น้ำจืดเพื่อการอุปโภคและบริโภคมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้หลายประเทศเกิดภาวะขาดแคลนน้ำจืด วิกฤติที่เกิดขึ้นสร้างความเสียหายในหลายด้าน และมีแนวโน้มที่จะรุนแรงมากขึ้น นอกจากนี้การสูงขึ้นของระดับน้ำทะเลอาจทำให้น้ำใต้ดินที่เป็นน้ำจืดกลายเป็นน้ำกร่อย (Brackish) หรือทำให้น้ำมีความเค็มมากขึ้น จากผลกระทบดังกล่าวส่งผลให้โลกมีน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มปริมาณมากกว่าน้ำจืด ดังนั้นจึงมีการคิดค้นกระบวนการแยกเกลือออกจากน้ำ (Desalination) เพื่อที่จะได้นำน้ำจืดไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเพียงพอ

กระบวนการแยกเกลือออกจากน้ำสามารถทำได้หลายวิธี โดยมีเป้าหมายคือ จะต้องทำให้กระบวนการนั้นประหยัดพลังงานและคุ้มค่าสำหรับการกำจัดไอออนในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย วิธีการกำจัดไอออนออกจากน้ำโดยความต่างศักย์ไฟฟ้า (Capacitive deionization, CDI) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่สามารถแยกเกลือออกจากน้ำได้ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดพลังงาน และคุ้มค่าสำหรับการแยกเกลือออกจากน้ำที่มีปริมาณเกลือต่ำหรือปานกลาง [2], [3]

Capacitive deionization หรือ CDI มีกลไกหลักๆ 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการดูดซับไอออนเพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์ หรือเรียกว่าการเพิ่มประจุ (Charging) และขั้นตอนต่อมา ไอออนที่ถูกดูดซับ (Adsorption) ไว้ในอิเล็กโทรด (Electrode) จะถูกปล่อยออกมา (Desorption) จึงทำให้อิเล็กโทรดสามารถใช้ซ้ำได้โดยเริ่มจากกระบวนการดูดซับสลับกับการคายซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจการกำจัดไอออนโดยวิธี CDI เพื่อเป็นการสร้างทางเลือกหนึ่งในการผลิตน้ำจืดจากน้ำเค็ม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาหลักการทำงานของกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำโดยความต่างศักย์ไฟฟ้า
- 2) ศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการกำจัดไอออนออกจากน้ำ
- 3) ศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำ เพื่อหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถแยกไอออนออกจากน้ำได้ดีที่สุด
- 4) ผลิตน้ำจืดจากน้ำเค็ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการทดลอง Capacitive deionization แบบ Single pass-mode (SP-Method) โดยการเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรดและคาร์บอนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยซิลเวอร์
- 2) ตัวแปรที่ใช้ศึกษา
ตัวแปรต้น คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการทดลอง เป็น 0.1, 0.4 และ 0.7 V ตัวแปรตาม คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และตัวแปรควบคุม คือ ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเกลือมีค่า 0.3 M

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถผลิตน้ำจืดจากน้ำเค็ม และสามารถนำไปใช้ได้จริง
- 2) ทราบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถแยกไอออนออกจากน้ำได้ดีที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์หรือคาร์บอนกัมมันต์มีชื่อเรียกภาษาอังกฤษคือ Activated carbon หรือ Activated charcoal ถูกผลิตขึ้นจากวัสดุจำพวกที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอย่างอื่นเป็นองค์ประกอบรวมในปริมาณเล็กน้อย เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน จากการเรียงตัวกันของแผ่นโครงสร้างอะตอมคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบ แผ่นโครงสร้างเหล่านี้มีการยึดติดกันด้วยพันธะเคมี บางส่วนมีการยึดเกาะกัน บางส่วนไม่ได้ยึดติดกันซึ่งเกิดเป็นช่องว่างที่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ทำให้ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างรูพรุนจำนวนมากมาย ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่คืออย่างหนึ่งของตัวดูดซับ ทำให้สามารถกักเก็บโมเลกุลต่างๆในพื้นที่ผิวภายในได้ [4]



รูปที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ [4]

2.1.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งโดยอาศัยหลักต่างๆ มากมายขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ [5] ได้แก่

1. การแบ่งตามลักษณะกายภาพของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (Granular activated carbon) มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับถ่านแบบผงและพื้นที่ผิวภายนอกมีขนาดเล็กลง ถ่านเหล่านี้จึงเหมาะสำหรับดูดซับไอระเหยเนื่องจากอัตราการแพร่กระจายเร็วกว่าชนิดอื่น

- ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered activated carbon) ถ่านกัมมันต์ผงในรูปแบบดั้งเดิมที่ยังนิยมใช้ โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15 ถึง 0.25 mm ถ่านแบบผงเหมาะกับการใช้งานแบบเติมลงในภาชนะของเหลวโดยตรงมากกว่าการบรรจุในท่อและปล่อยของเหลวไหลผ่านถ่านเนื่องจากการสูญเสียผงถ่านได้ง่าย

- ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded activated carbon) เป็นถ่านที่นำมาขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8 ถึง 45 mm เหมาะสำหรับกรองดูดซับก๊าซเพราะมีความแข็งแรงเชิงกลสูงและมีปริมาณฝุ่นละอองต่ำ

- ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่ได้จากการเติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น โลหะเงิน ไอโอดีน ไอออนบวกจำพวก อะลูมิเนียม (Al) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) ลิเทียม (Li) และแคลเซียม (Ca) ทำให้สามารถนำไปใช้ฆ่าเชื้อโรคได้ รวมทั้งมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำของเครื่องกรองน้ำ

- ถ่านกัมมันต์เคลือบพอลิเมอร์ (Polymer-coated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ทางชีวภาพเพื่อให้ผิวเรียบและดูดซับโดยไม่ปิดกั้นรูพรุน ใช้เป็นวัสดุสำหรับดูดซับสารพิษออกจากเลือด

2. การแบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 nm มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สและไอระเหย

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2 – 50 nm มักนำไปใช้ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 nm โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กและมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

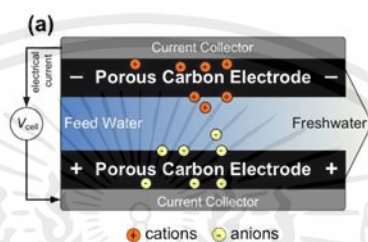
2.2 หลักการของ Capacitive deionization (CDI)

ดังรูปที่ 2.2 (ก) [2] มีการใส่กระแสไฟฟ้า (Current) หรือความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) เข้าไปในเซลล์ จึงทำให้มีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ที่อิเล็กโทรดทั้ง 2 ข้างโดยแต่ละข้างเป็นประจุที่ตรงข้ามกัน หลังจากปล่อยให้ น้ำเค็มไหลผ่านเข้าไปในเซลล์ ไอออนภายในน้ำโดยมีทั้ง Cations และ Anions จะถูกดึงดูดโดยประจุที่เกาะอยู่อิเล็กโทรด [3] โดยประจุของไอออนในสารละลายที่เป็นประจุชนิดเดียวกันกับประจุที่อิเล็กโทรด จะเรียกว่า Co-ion และประจุของไอออนในสารละลายที่เป็นประจุต่างชนิดกันกับประจุที่อิเล็กโทรด จะเรียกว่า Counterions โดย Counterions จะถูกดูดซับไว้ใน Electrical double layers (EDLs) ที่อยู่ภายในรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) ดังรูปที่ 2.3 (ก,ข) โดยช่วงที่ไอออนถูกดูดซับไว้ เรียกว่าช่วง Adsorption หรือการดูดซับ และ Co-ion จะถูกผลักออกและไหลออกไปพร้อมกับน้ำผ่านช่องว่างตรงกลาง [2]

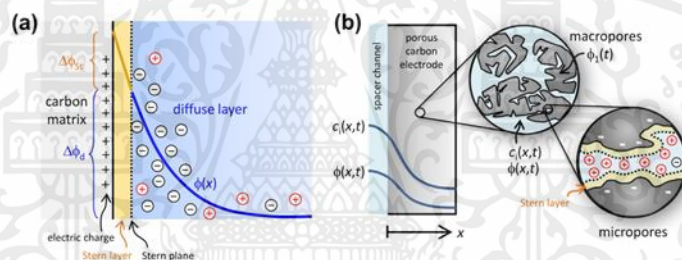
เมื่อเซลล์มีการดำเนินการมาระยะหนึ่ง ภายในรูพรุนจะมีไอออนที่ถูกดูดซับไว้เป็นจำนวนมาก ทำให้ความสามารถการดูดซับลดลงจนตัวดูดซับอิ่มตัว จึงต้องมีการปล่อยไอออนที่ถูกกักเก็บไว้ใน

อิเล็กโทรด หรือเรียกว่า Regeneration โดยการลดแรงดันของเซลล์ลงหรือปรับความศักย์ไฟฟ้าของวงจรเป็นแรงดันย้อนกลับ (Reverse voltage) หลังจากนั้นไอออนที่ถูกปล่อยออกมา (Ion-removal) จะถูกปล่อยออกไปที่สายของน้ำที่ไม่ต้องการ (Waste water) [2], [3] จะเรียกช่วงนี้ว่า Desorption หรือ การคายซับ

ในช่วงการคายซับ ความเข้มข้นของเกลือที่อยู่ภายในรูพรุนขนาดแมโครพอร์ (Macropores) จะมีค่าลดลง และเมื่อถึงสมดุล ความเข้มข้นของเกลือภายในแมโครพอร์ จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นภายนอกอิเล็กโทรด หรือมีความเข้มข้นเท่ากับน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างตรงกลาง [2]



รูปที่ 2.2 แผนผังจำลองของ Capacitive deionization (CDI) [2]



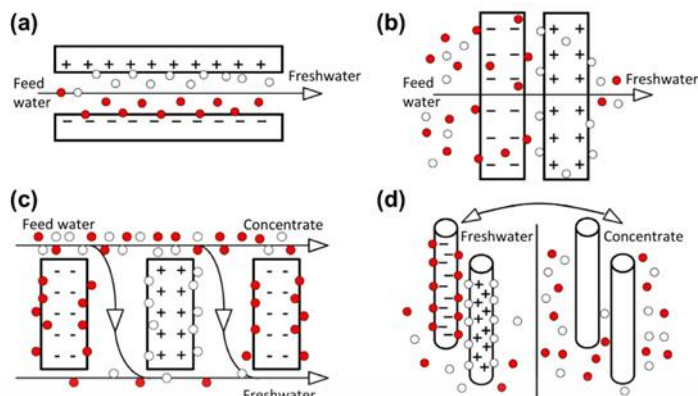
รูปที่ 2.3 (ก) แบบจำลองไอออนและประจุที่สะสมอยู่ใน Electrical double layers (EDLs)

(ข) แบบจำลองรูพรุนที่อยู่ภายในอิเล็กโทรด [2]

2.2.1 รูปแบบของ Capacitive deionization (CDI)

รูปแบบของ Capacitive deionization หรือ CDI สามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ ดังตัวอย่างใน รูปที่ 2.4 โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้รูปแบบ Flow-by (รูปที่ 2.4 (ก))

รูปแบบ Flow-by โดยจะต้องมีแผ่นอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน (Porous carbon electrode) อย่างน้อยจำนวน 2 แผ่น โดยมีความหนาแน่นระหว่าง 100 μm ถึง 500 μm และช่องว่างที่น้ำไหลผ่านควรมีความกว้างอย่างน้อย 1 mm หรือสามารถสร้างจากวัสดุที่มีรูพรุนเป็นชั้นบางๆ ที่มีความหนาแน่นระหว่าง 100 μm ถึง 300 μm โดยส่วนใหญ่การทำ CDI รูปแบบ Flow-by ภายในห้องทดลองนั้น จะใช้อิเล็กโทรดอยู่ในช่วง 5 \times 5 cm^2 ถึง 10 \times 10 cm^2 [2]

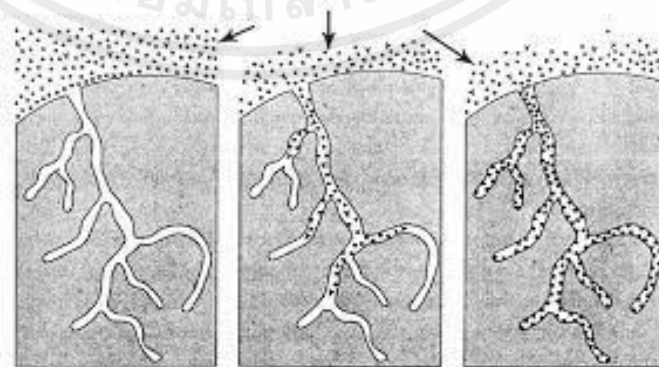


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปแบบของ Capacitive deionization (CDI) (ก) รูปแบบ Flow-by (ข) รูปแบบ Flow-through (ค) รูปแบบ Electrostatic ion pumping และ (ง) รูปแบบ การแยกเกลือออกจากน้ำพื้นด้วยลวด เมื่อวงกลมสีแดงคือ Anions และวงกลมสีขาวคือ Cations [2]

2.3 กลไกการดูดซับ (Mechanism of adsorption)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังพื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็งการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ระยะ [6] ดังนี้

- ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ
- ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ
- ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน แต่ในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งทางอุตสาหกรรมการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนตัวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ในกระบวนการดูดซับ [6]

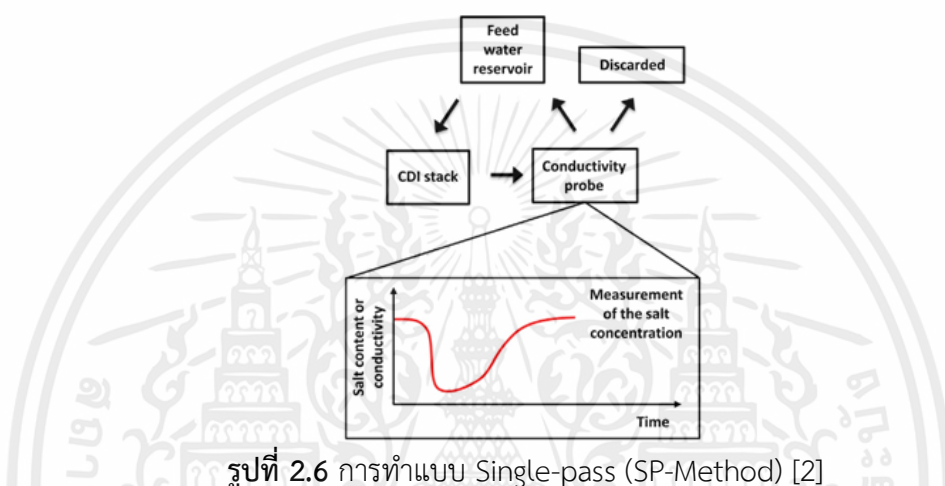
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองแยกเกลือออกจากน้ำโดยวิธีการทำแบบ CDI สามารถทำได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ [2]

2.4.1 การทำแบบ Single-pass (SP-Method)

น้ำจะถูกป้อนจากถังกักเก็บ ผ่านเข้าไปในเครื่อง CDI และไหลออกมา โดยจะติดตั้งตัววัดค่าความเค็มหรือวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ไว้ที่ทางออก ในการทำลักษณะนี้ ค่าความเค็มของน้ำที่ไหลออกจะมีค่าลดลงหลังจากมีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป และเพิ่มขึ้นเมื่อมีการคายซับ โดยน้ำทิ้งที่ไหลออกมาจะนำมาใช้ใหม่หรือทิ้งก็ได้ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทำแบบ Single-pass (SP-Method) [2]

2.5 Faradaic reaction

ในการกำจัดไอออนด้วยกระบวนการ CDI นอกจากอิเล็กโทรดจะมีการดูดซับไอออนแล้ว ยังมีโอกาสเกิด Faradaic reaction ด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้การกำจัดไอออนมีประสิทธิภาพลดลง โดยสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) แบ่งออกเป็น [3], [7]

2.5.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด (Anodic oxidation reactions)

คือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด เช่น การออกซิเดชันของคาร์บอน (Carbon oxidation) และ การออกซิเดชันของคลอไรด์และน้ำ (Chloride and water oxidation)

1) การออกซิเดชันของคาร์บอน

ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้น



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาหลักที่ส่งผลกระทบต่ออิเล็กโทรดคาร์บอน เช่น ทำให้ปริมาณของคาร์บอนในอิเล็กโทรดลดลง ส่งผลให้อิเล็กโทรดเสื่อมสภาพ และมีประสิทธิภาพลดลง

2) ออกซิเดชันของคลอไรด์และน้ำ (Chloride and water oxidations)

ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้น



จากสมการจะเห็นว่า อาจมี ClO_3^- เกิดขึ้นระหว่างการทำ CDI ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของน้ำ นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ค่า pH ของน้ำเปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย

2.5.2 ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด (Cathodic reduction reactions)

คือปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดที่ขั้วแคโทด เช่น การรีดักชันของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen reduction)

รีดักชันของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen reduction)

ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้น



ในสารละลายเกลืออาจมีออกซิเจนละลายอยู่ ระหว่างการแยกไอออนอาจทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ส่งผลให้ค่า pH ของน้ำเปลี่ยนแปลงไป

2.6 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ทำการทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์และสรุป 2 หลักการของอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ได้ว่า “ปริมาณสารที่ใช้ไปหรือเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ในเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะแปรผันตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปนั้น” [7], [8]

กฎข้อที่ 1 : ปริมาณของสารเคมีที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือประจุที่ไหลผ่านเซลล์ไฟฟ้า โดยมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb, C) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 1

$$q = It \quad (1)$$

เมื่อ	q	คือ ปริมาณไฟฟ้า (C)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
	t	คือ เวลา (s)

กฎข้อที่ 2 : ในการแยกสลายด้วยไฟฟ้า น้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสาร (Equivalent weight)

$$\text{ประจุของ } 1 e^- = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$1 \text{ Faraday} = \text{ประจุของ } e^- \text{ 1 mol } (6.02 \times 10^{23} e^-)$$

$$= 9.65 \times 10^4 \text{ C}$$

2.6.1 น้ำหนักสมมูล (Equivalent weight, eq. wt.)

น้ำหนักสมมูล หมายถึง น้ำหนักของสารใดๆ ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับไฮโดรเจน 1 กรัม อะตอม หรือน้ำหนักของสารใดๆ ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับแคตไอออนที่เกิดปฏิกิริยา (Reacting cation) ชนิดยูนิวาเลนต์ (Univalent) หรือไอออนที่มีประจุบวกหนึ่ง จำนวน 1 กรัมอะตอม และสามารถหาได้จากน้ำหนักโมเลกุลหารด้วยเลขออกซิเดชันที่เปลี่ยนไปในปฏิกิริยารีดอกซ์ ค่าของน้ำหนักสมมูลขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

2.7 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity, Q)

$$Q = \frac{\left(\int_0^{t_{\text{ads}}} (C_i - C_t) \cdot dt \right) \cdot \dot{V}}{M_{\text{carbon}}} \quad (2)$$

เมื่อ	Q	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg _{salt} /g _{carbon})
	t _{ads}	คือ เวลาในการดูดซับ (s)
	C _i	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/l)
	C _t	คือ ความเข้มข้นขาออกของสารละลาย ณ เวลาใดๆ (mg/l)
	\dot{V}	คือ อัตราการไหลของสารละลาย (ml/min)
	M _{carbon}	คือ มวลของตัวดูดซับ (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 ประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorption efficiency, EFF)

$$EFF = \frac{C_i - C_t}{C_i} \quad (3)$$

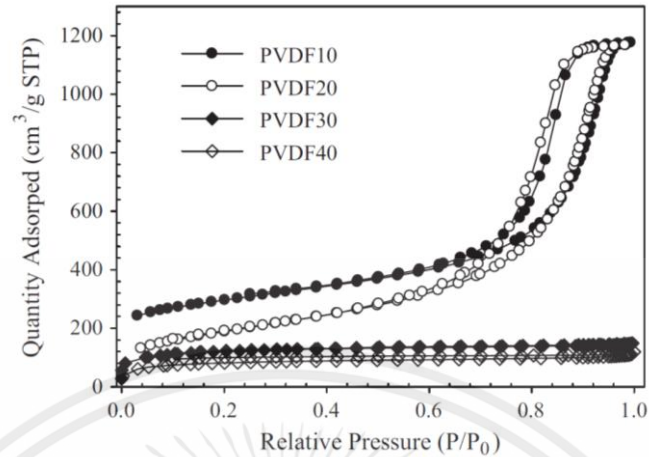
เมื่อ	EFF	คือ ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
	C_i	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/l)
	C_t	คือ ความเข้มข้นขาออกของสารละลาย ณ เวลาใดๆ (mg/l)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

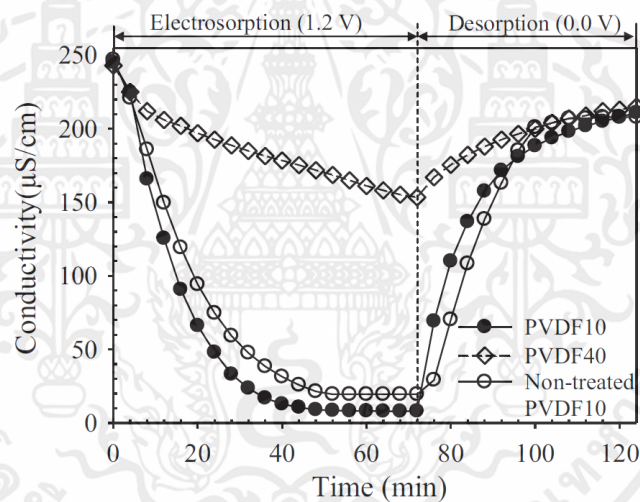
Chia-Hung Hou และคณะ [9] ศึกษาการประติขันธ์อิเล็กโทรดแผ่นโดยการผสมผงถ่านกัมมันต์กับสารยึดเกาะพอลิเมอร์ PVDF โดยศึกษาอัตราส่วนน้ำหนักของ PVDF ที่แตกต่างกัน โดยใช้ปริมาณ PVDF ที่ 10%, 20%, 30% และ 40% ตามลำดับ เตรียมตัวอย่างโดยการผสมสารจนเป็นเนื้อเดียวกัน และกระบวนการทำให้แห้ง (Drying Process) ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารยึดเกาะพอลิเมอร์ PVDF ในอิเล็กโทรดคาร์บอน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ดังนั้นการใส่สารยึดเกาะพอลิเมอร์ PVDF ด้วยอัตราส่วน 10% ของน้ำหนักจึงมีความสามารถในการดูดซับด้วยไฟฟ้าได้ดีกว่า

รูปที่ 2.7 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนสำหรับอิเล็กโทรด สังเกตได้ว่าอิเล็กโทรดทั้งหมดแสดงไอโซเทอมประเภท IV เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง ในช่วงแรกที่มีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมเป็นรูปตัวเอส แสดงถึงตำแหน่งผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากการเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทรีซิสลูป ในช่วง Desorption การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน สำหรับไอโซเทอมของ PVDF10 และ PVDF20 แสดงฮิสเทรีซิสลูปที่ค่อนข้างใหญ่ ซึ่งบ่งบอกถึงการมีรูพรุนขนาดใหญ่และพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อนำไปหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) จะพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอิเล็กโทรด PVDF10 และ PVDF20 เท่ากับ 984 และ 680 m^2/g ตามลำดับ และจากการศึกษาการปรับปรุงอิเล็กโทรดโดยการบำบัดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเปรียบเทียบอิเล็กโทรด PVDF10 และ PVDF40 ที่มีการบำบัดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ PVDF10 ที่ไม่ได้มีการบำบัดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าอิเล็กโทรด PVDF10 ที่มีการบำบัดด้วย KOH มีประสิทธิภาพการดูดซับด้วยไฟฟ้าสูงสุด ในระหว่างการคายประจุศักย์ไฟฟ้า 0.0 V การนำไฟฟ้าของสารละลายจะกลับไปเป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งหมายความว่า

ไอออนจะถูกปล่อยออกมากลับสู่สารละลาย ค่าความแตกต่างระหว่างค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นและค่านำไฟฟ้าสุดท้าย ทำให้สามารถคำนวณความสามารถการดูดซับด้วยไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 2.8



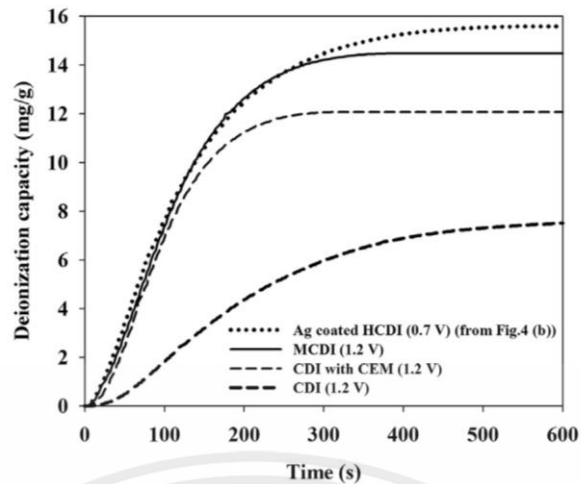
รูปที่ 2.7 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนสำหรับอิเล็กโทรด [9]



รูปที่ 2.8 การแปรผันของการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.002 M [9]

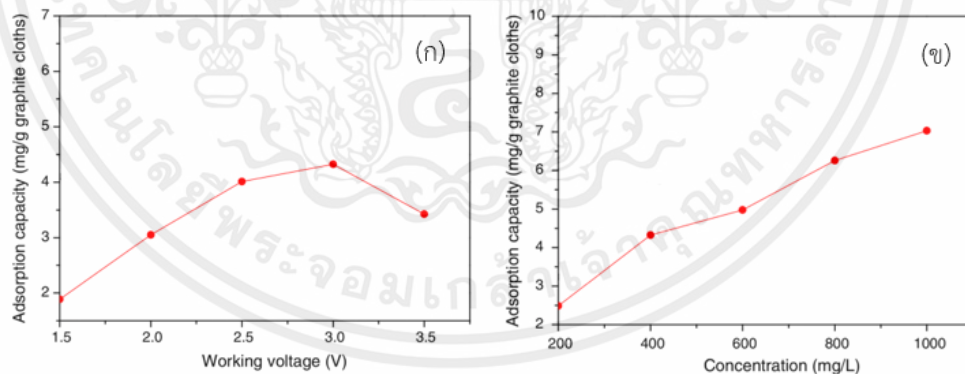
Hongsik Yoon และคณะ [10] ศึกษาการเคลือบคาร์บอนคอมโพสิตอิเล็กโทรดซิลเวอร์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด และทำการทดลองโดยการนำซิลเวอร์เคลือบคาร์บอนคอมโพสิตอิเล็กโทรดด้วยวิธีการฉายรังสี UV-C แล้วนำไปทดลอง ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการกำจัดไอออนของ Hybrid Capacitive deionization (HCDI) ที่เคลือบด้วยซิลเวอร์ นั้นดีกว่า CDI ที่มี CEM และ MCDI ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.9 ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการกำจัดไอออนของ HCDI ที่เคลือบด้วยซิลเวอร์ คือ 15.6 mg/g ในขณะที่ของ Membrane Capacitive deionization (MCDI), Capacitive deionization (CDI) ที่มี Cation Exchange Membrane (CEM) และ Capacitive deionization คือ 14.5 12.1 และ 7.5 mg/g ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดไอออน [10]

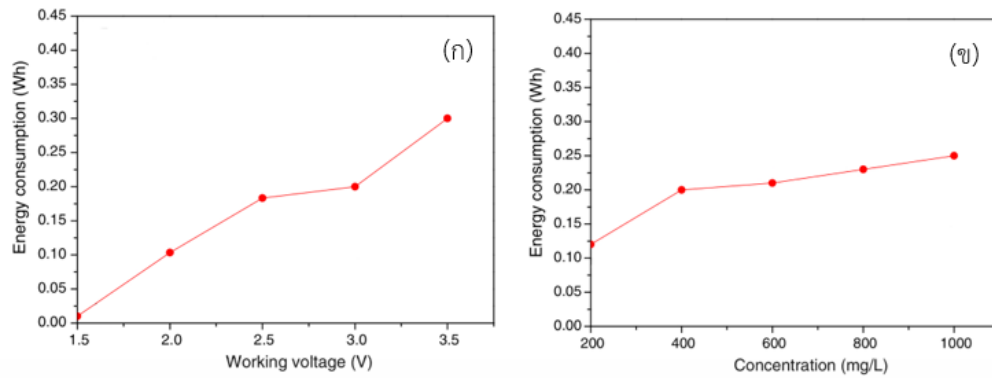
Yajing Zhao และคณะ [11] ศึกษาความสามารถการดูดซับไอออน (Adsorption capacity) ของอิเล็กโทรดโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายขาเข้าที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่ามากขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอออนก็มีค่ามากขึ้นด้วยดังรูปที่ 2.10(ก) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่าความสามารถการดูดซับของอิเล็กโทรดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายขาเข้า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายขาเข้าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับสารละลายก็เพิ่มขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 2.10(ข)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการดูดซับและ (ก) ความต่างศักย์ที่ใช้ (ข) ความเข้มข้นของสารละลายขาเข้า ใน CDI [11]

นอกจากนี้ในการทดลองจากรูปที่ 2.11(ก) Zhao และคณะ พบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้น ระบบจะมีการใช้พลังงาน (Energy consumption) ที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายขาเข้า จากรูปที่ 2.11(ข) ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของสารละลายขาเข้าไม่ได้ส่งผลต่อการใช้พลังงานมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้และ (ก) ความต่างศักย์ (ข) ความเข้มข้นของสารละลาย
 ขาเข้าที่ใช้ใน CDI [11]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. กรรไกร (Scissor)
2. ปีกเกอร์ (Beaker)
3. ช้อนตักสาร (Spatula)
4. โกร่งบดสาร (Mortar and pestle)
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Laboratory weighting apparatus)
6. แท่งแก้วกวนสาร (Stirring rod)
7. ปิเปตต์ (Pipette)
8. ลูกยางสำหรับปิเปตต์ (Pipette bulb)
9. ตู้อบ (Oven)
10. ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven)
11. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
12. เครื่องฆ่าเชื้อด้วย UV-C (UV-C Sterilizer)
13. ปั๊ม (Pump)
14. สายยาง (Hose) ความยาว 1 m
15. ข้อต่อสายยาง (Hose connector) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm
16. แผ่นอะคริลิกใส (Acrylic sheet)
17. แผ่นซิลิโคน (Silicone sheet)
18. แผ่นทองแดงแข็ง (Copper sheet)
19. น็อต (Bolts)
20. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply)
21. โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter)

3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon; AC) จาก บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
2. เกลือบริสุทธิ (Sodium Chloride; NaCl) จาก บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
3. ด่างคลี (Potassium Hydroxide; KOH) จาก บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
4. โซดาไฟ (Sodium Hydroxide; NaOH) จาก บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) จาก Shandong Gelon Lib Co.,Ltd.
6. ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver Nitrate; AgNO_3) จาก บริษัท แกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
7. เอ็น-เมทิล-2-ไพร์โรลิโดน (N-Methyl-2-pyrrolidone; NMP) จาก บริษัท วินเน็คซ์ (ประเทศไทย) จำกัด
8. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) จาก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
9. ซิลิโคนยาแนว จาก บริษัท ซีอาร์ซี ไทวัสดุ จำกัด

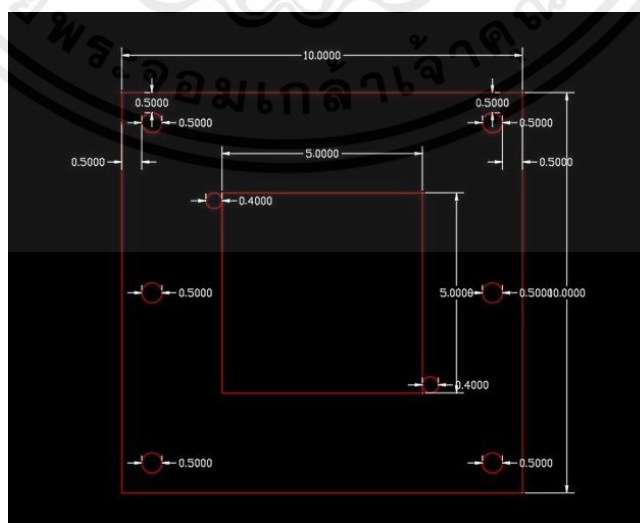
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่

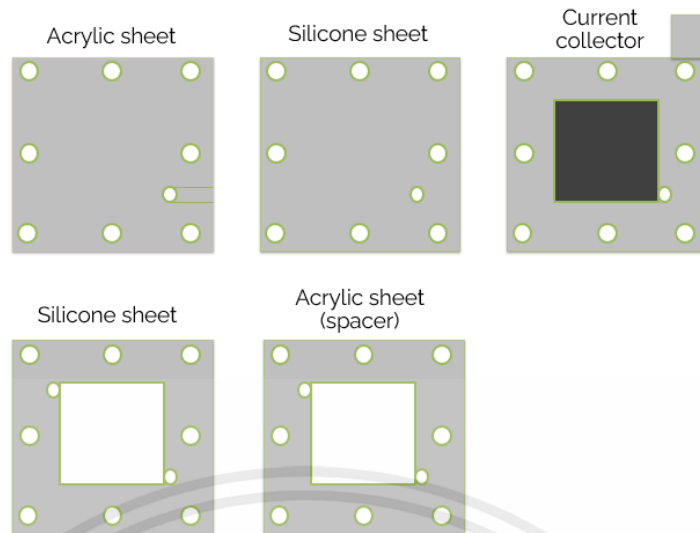
- ส่วนที่ 1 การออกแบบ CDI stack
- ส่วนที่ 2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Standard calibration curve)
- ส่วนที่ 3 การเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรด
- ส่วนที่ 4 การเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยซิลเวอร์
- ส่วนที่ 5 การเตรียมอัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสม
- ส่วนที่ 6 การทดลอง Capacitive deionization แบบ Single pass-mode (SP-Method)

3.3.1 การออกแบบ CDI stack

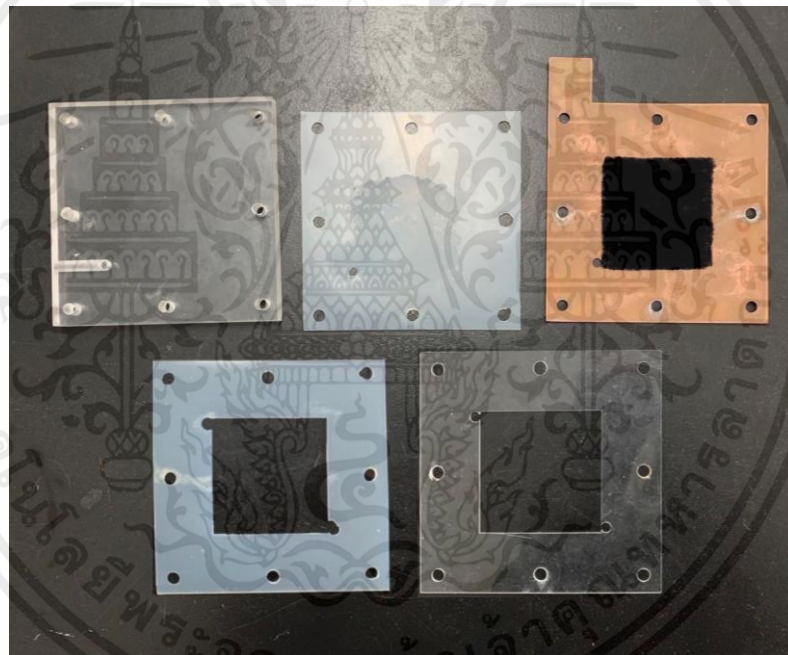
1. ออกแบบชิ้นงานโดยสร้างภาพฉาย 2 มิติ สำหรับแผ่นอะคริลิก แผ่นซิลิโคน และแผ่นทองแดง
2. นำแบบ 2 มิติ ไปตัดชิ้นงานโดยใช้เครื่องเครื่องตัดเลเซอร์ (Laser cutting machine)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างภาพฉาย 2 มิติสำหรับแผ่นอะคริลิกและแผ่นซิลิโคน สร้างโดยโปรแกรม AutoCAD เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างภาพ 2 มิติ ส่วนประกอบของ CDI stack



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของ CDI stack

3.3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมสารละลายเกลือปริสทรีความเข้มข้น 1 M เป็นสารละลายตั้งต้น
2. ใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย
3. เจือจางสารละลายตั้งต้น โดยให้ความเข้มข้นลดลงครึ่งละ 0.1 M และวัดค่าการนำไฟฟ้า ทำต่อเนื่องจนความเข้มข้นของสารละลายมีค่า 0.1 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนการทดลองดังกล่าว จะได้กราฟมาตรฐานเพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายเกลือ โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายเป็นแกน x และค่าการนำไฟฟ้าเป็นแกน y

3.3.3 การเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรด [12]

1. นำผงถ่านกัมมันต์และสาร PVDF ไปชั่งเครื่องชั่งน้ำหนัก ด้วยอัตราส่วน 75:25 โดยน้ำหนัก
2. นำมาผสมสารละลาย NMP ปริมาณ 2 ml จนได้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน
3. นำสารละลายที่ได้ปาดบนแม่พิมพ์ให้มีขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ และนำไปอบแห้งในเตาอบที่ $100 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำไปอบในตู้อบสุญญากาศ ที่ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนได้เป็นแผ่นคาร์บอน
5. นำแผ่นคาร์บอนแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 M เป็นเวลา 30 นาที และชะล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
6. นำแผ่นคาร์บอนเข้าอบในตู้อบสุญญากาศที่ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนได้แผ่นคาร์บอนอิเล็กโทรด

3.3.4 การเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยซิลเวอร์

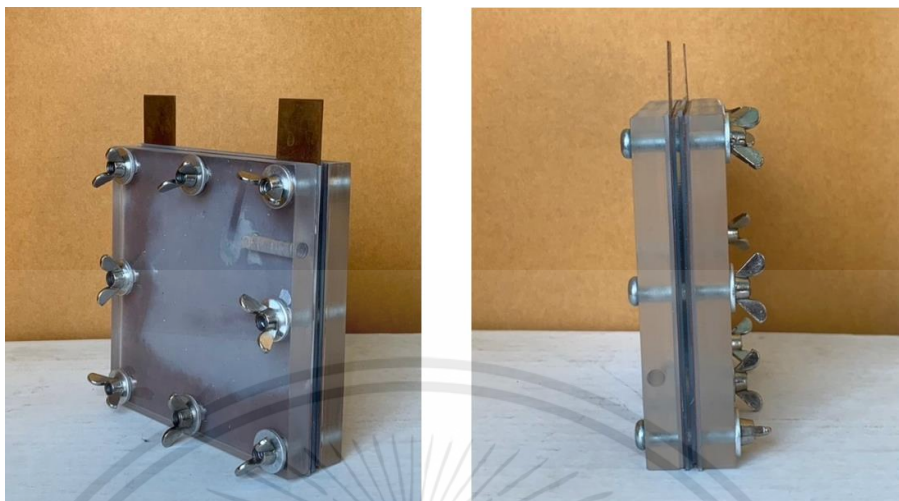
1. นำอิเล็กโทรดคาร์บอนแช่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ความเข้มข้น 50 mM เป็นเวลา 30 นาที
2. นำไปจุ่มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 10 วินาที และชะล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
3. นำไปอบในตู้อบสุญญากาศ ที่ $80 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.5 การเตรียมอัตราการไหลที่เหมาะสม

1. ประกอบ stack
ด้านแคโทด: ใส่ขั้วที่แผ่นอะคริลิกหนา หลังจากนั้นใส่แผ่นซิลิโคน แผ่นทองแดงที่มีคาร์บอนอิเล็กโทรด แผ่นซิลิโคน และแผ่นอะคริลิกบาง ตามลำดับที่แสดงดังรูปที่ 3.2
ด้านแอโนด: มีลำดับการจัดเรียงเช่นเดียวกับด้านแคโทด แต่เปลี่ยนแผ่นทองแดงที่มีคาร์บอนอิเล็กโทรด เป็นแผ่นทองแดงที่มีคาร์บอนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยซิลเวอร์ หลังจากนั้นหมุนน็อตให้แน่นเพื่อป้องกันการรั่วไหลของน้ำ
2. เตรียมน้ำใส่ปั๊มเกอร์ และนำ CDI stack ต่อสายยางเข้ากับปั๊ม โดยปรับ Stroke length ของปั๊มในช่วง 5 – 15% และ Stroke rate 25%
3. ปรับ Stroke length ของปั๊ม 5% วัดปริมาณสารละลาย เป็นเวลา 1 นาที จำนวน 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปรับ Stroke length ของปั๊มเป็น 10% และ 15% และทำตามข้อที่ 3 เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการแตกหักของอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.4 CDI stack

3.3.6 การทดลอง Capacitive deionization แบบ Single pass-mode (SP-method)

- เตรียมสารละลายเกลือบริสุทธิ์ความเข้มข้น 0.3 M (บีกเกอร์ 1) และน้ำปราศจากไอออน (บีกเกอร์ 2) อย่างละบีกเกอร์
- ตั้งค่าปั๊มให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 15 mL/min
- ปรับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 V โดยใช้โวลต์มิเตอร์เป็นตัวตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า
- เริ่มต้นทำการทดลองโดยปล่อยให้สารละลายเกลือบริสุทธิ์ไหลผ่านเข้าไปใน CDI stack เพื่อแยกไอออนออกจากน้ำ
- เก็บสารละลายขาออกทุก 30 วินาที และวัดค่าการนำไฟฟ้า
- นำค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้ หาความเข้มข้นของเกลือจากกราฟมาตรฐาน
- เมื่อค่าการนำไฟฟ้าเริ่มมีค่าคงที่ ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 0 V เพื่อให้อิเล็กโทรดเกิดการคายซับ
- เปลี่ยนสายป้อนเป็นน้ำปราศจากไอออน (บีกเกอร์ 2) และเปลี่ยนบีกเกอร์รองสารเป็นบีกเกอร์สำหรับใส่สารละลายเกลือเข้มข้น
- เก็บสารละลายขาออกทุก 30 วินาที และวัดค่าการนำไฟฟ้า
- นำค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้ หาความเข้มข้นของเกลือจากกราฟมาตรฐาน
- เมื่อค่าการนำไฟฟ้าเริ่มมีค่าคงที่ ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 0.1 V เพื่อให้อิเล็กโทรดเกิดการดูดซับ
- เปลี่ยนสายป้อนเป็นสารละลายเกลือบริสุทธิ์ (บีกเกอร์ 1) และเปลี่ยนบีกเกอร์รองสารเป็นบีกเกอร์สำหรับใส่น้ำจืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ทำตามข้อ 5 – 12
14. นำผลที่ได้ไปหาความสามารถการดูดซับของอิเล็กโทรด (Adsorption capacity)
15. ทำการทดลองใหม่อีกครั้ง โดยเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ เป็น 0.4 และ 0.7 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

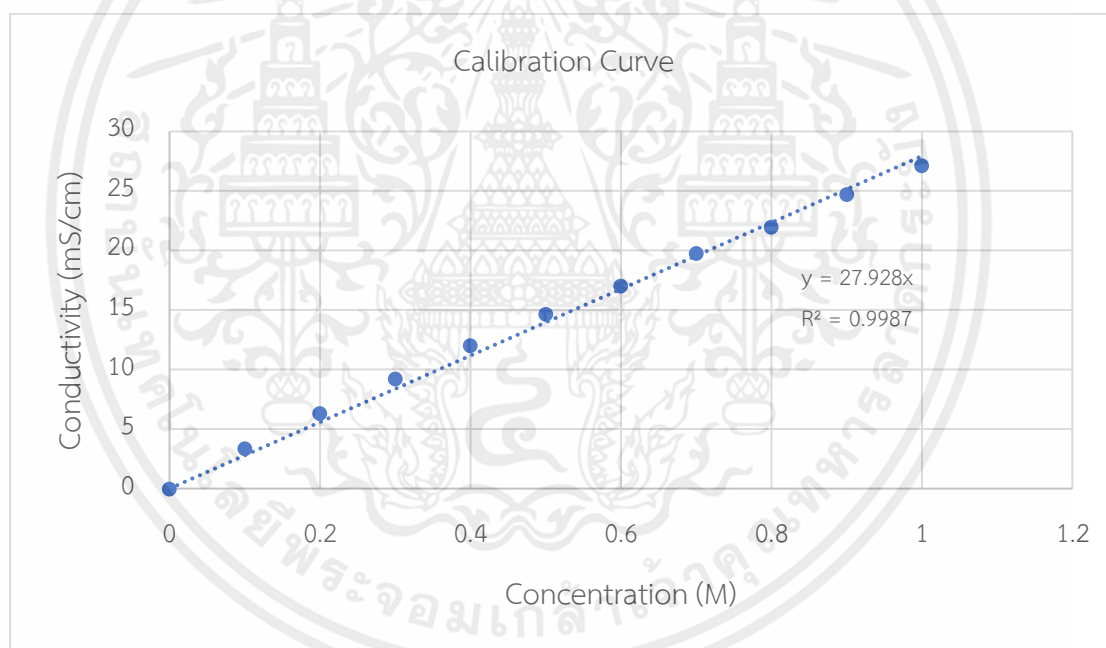
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการทดลอง Capacitive deionization แบบ Single pass-mode (SP-Method) โดยการเตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรดและคาร์บอนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยซิลเวอร์ โดยทำการทดลองภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.3 M จากนั้นนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์หาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถแยกไอออนออกจากน้ำได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ผลที่ได้ดังนี้

4.1 ค่าการนำไฟฟ้าสำหรับสารละลาย

จากการทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์โดยใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้า ในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 1 M จะได้สมการเส้นตรง $y_c = 27.928x$ เพื่อนำค่าการนำไฟฟ้ามาคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

4.2 วัดอัตราการไหล

จากตารางที่ 4.1 เมื่อปรับ Stroke length ของปั๊มที่ 5 10 และ 15% จะได้ค่าเฉลี่ยปริมาณของน้ำเท่ากับ 9.87 15.07 และ 29.77 ml ตามลำดับ ซึ่งสามารถคิดเป็นอัตราการไหลเท่ากับ 9.87 15.07 และ 29.77 ml/min ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า Stroke length ที่ 5% มีปริมาณน้ำน้อยเมื่อทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าอาจทำให้ค่าคลาดเคลื่อนได้ ส่วน Stroke length ที่ 15% ขณะทำการทดลองพบว่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเข้าไปยัง CDI stack รวดเร็วซึ่งอิเล็กโทรดไม่สามารถดูดซับได้ทัน ผู้วิจัยจึงเห็นได้ว่าการใช้ Stroke length ที่ 10% นั้นมีความเหมาะสมในการทดลอง

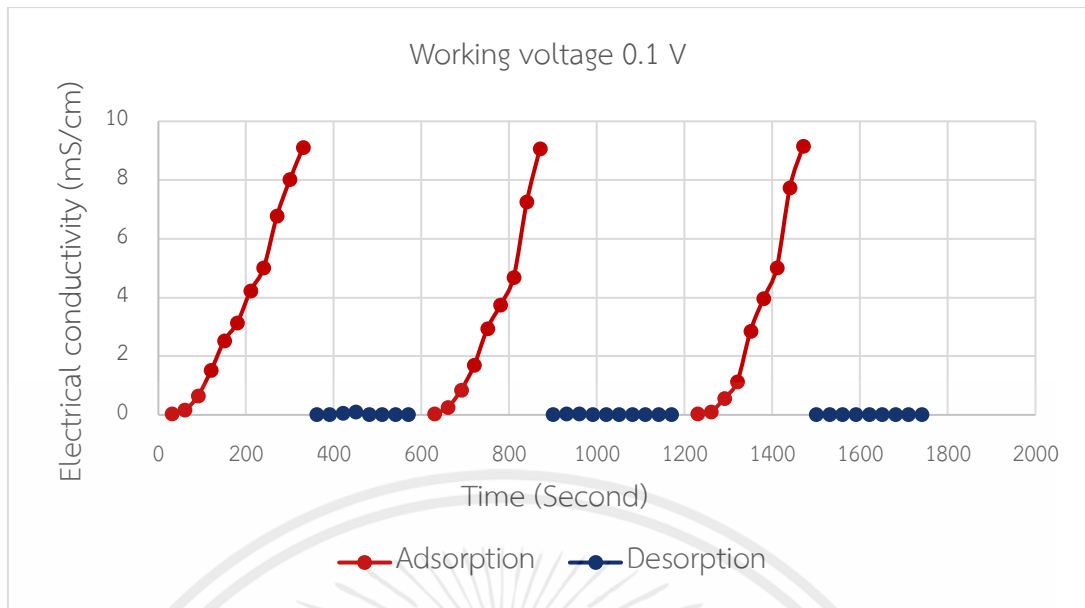
ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราการไหล

ระยะชัก (%)	ปริมาณของน้ำ (ml)			เฉลี่ย (ml)	อัตราการไหล (ml/min)
	1	2	3		
5	10	9.6	10	9.87	9.87
10	15.2	15	15	15.07	15.07
15	29.5	30	29.8	29.77	29.77

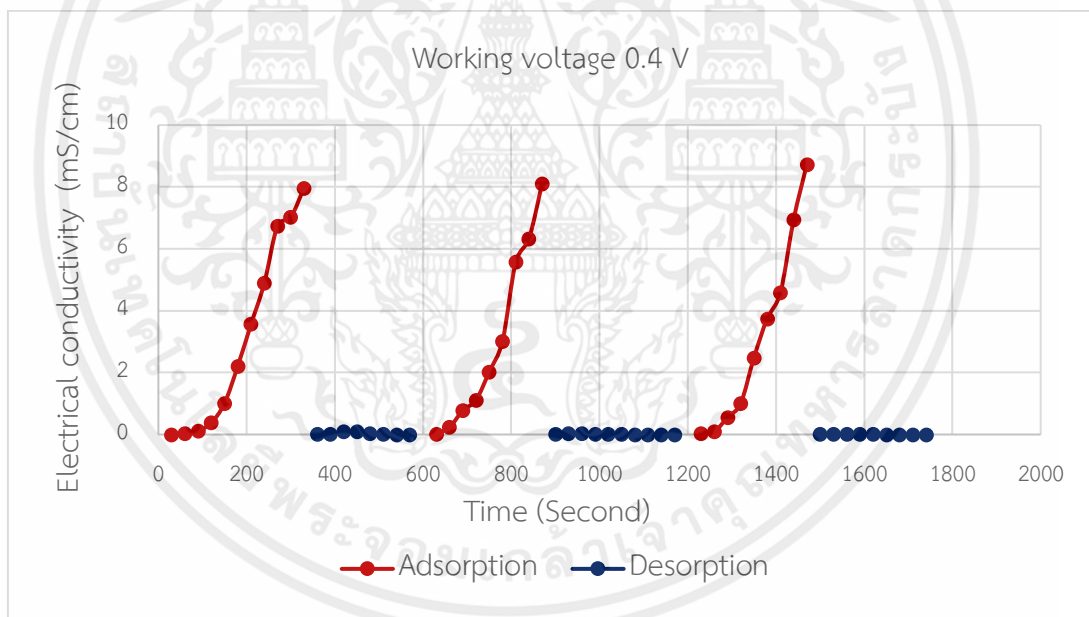
4.3 ศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ครั้งละ 3 รอบ (Cycle) ได้แก่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 0.3 M และอัตราการไหล 15 ml/min ในการศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดจะพิจารณาภายใต้ความสามารถการดูดซับ (Adsorption capacity) และประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorption efficiency)

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของอิเล็กโทรด พบว่าในแต่ละรอบของการดูดซับ อิเล็กโทรดสามารถดูดซับไอออนจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ได้มีประสิทธิภาพดีในช่วงระยะเวลา 3 – 4 นาทีแรกของการดูดซับ เมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายขาออก พบว่าในช่วง 3 – 4 นาทีแรกจะได้สารละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าเทียบเท่ากับน้ำจืดที่สามารถดื่มและใช้ในการชลประทานได้ โดยค่าการนำไฟฟ้ามีค่า 0 – 2.5 mS [13] และในช่วงการคายซับ พบว่าวงจรแรงดันย้อนกลับ (Reverse voltage) สามารถทำให้ไอออนที่ถูกดูดซับไว้ในอิเล็กโทรดหลุดออกมาได้จริง เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนระบบเป็นช่วงการดูดซับการทำงานของอิเล็กโทรดสามารถกลับมามีประสิทธิภาพใกล้เคียงเดิม การปรับวงจรแรงดันย้อนกลับในช่วงการคายซับอาจมีไอออนบางส่วนที่ไม่สามารถหลุดออกมาได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดในแต่ละรอบลดลง ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 [14]

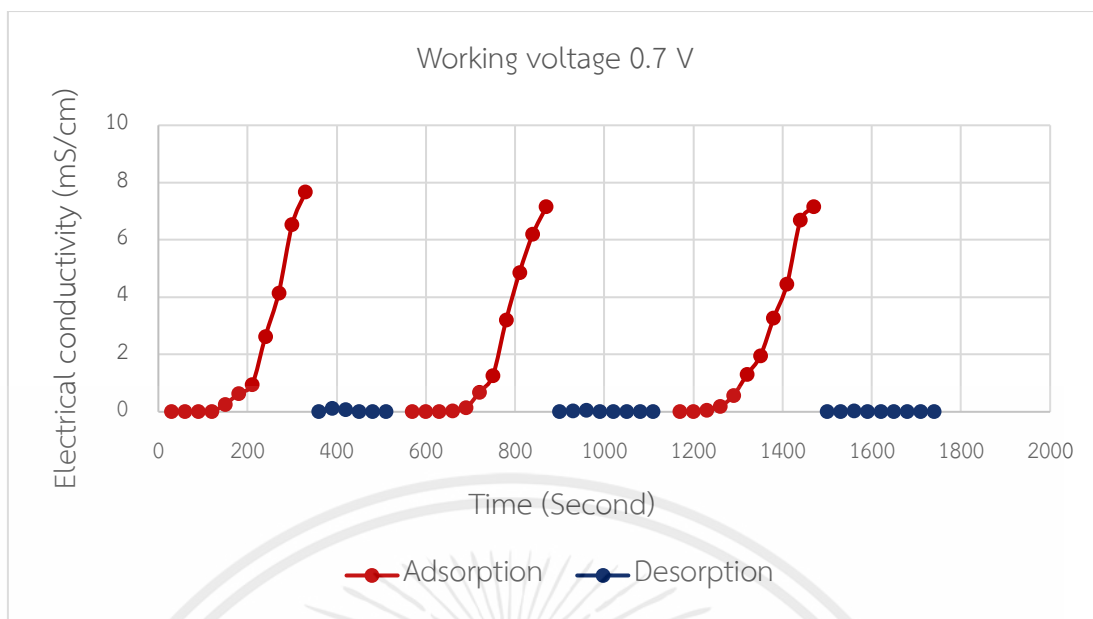


รูปที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ 0.1 V



รูปที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ 0.4 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ 0.7 V

จากผลการทดลอง เมื่อนำค่ามาคำนวณความสามารถการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเกลือมีค่า 0.3 M เมื่อพิจารณาความสามารถการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับในแต่ละรอบของการดูดซับ แสดงผลดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

เมื่อนำความสามารถการดูดซับของอิเล็กโทรดทั้ง 3 รอบของแต่ละช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกัน พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกไอออนออกจากน้ำส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของอิเล็กโทรด เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับของอิเล็กโทรดก็มีค่ามากขึ้นด้วย โดยความสามารถการดูดซับเมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V มีค่า 1,413.76 1,631.69 และ 2,404.20 $\text{mg}_{\text{salt}}/\text{g}_{\text{carbon}}$ ตามลำดับ หรือสามารถกล่าวได้อีกอย่างว่า คาร์บอน 1 g สามารถดูดซับโซเดียมคลอไรด์ได้ 1,413.76 1,631.69 และ 2,404.20 mg ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 และ 0.4 V

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (V)	ความสามารถการดูดซับ ($\text{mg}_{\text{salt}}/\text{g}_{\text{carbon}}$)			ผลรวมความสามารถการดูดซับ ($\text{mg}_{\text{salt}}/\text{g}_{\text{carbon}}$)
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	
0.1	8.3660	7.8476	7.9532	1,413.7581
0.4	10.4987	8.9802	8.4133	1,631.6913
0.7	14.4683	13.9212	12.7080	2,404.2049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

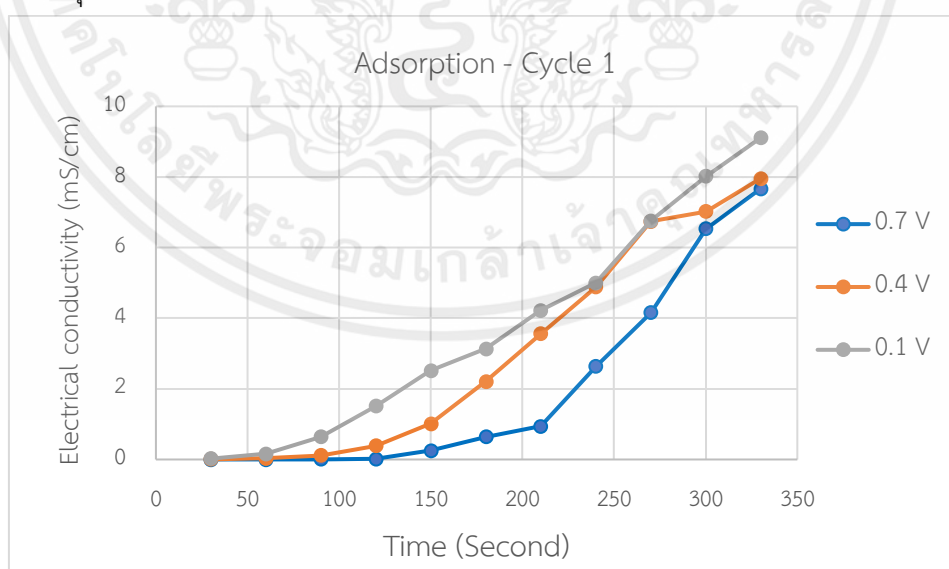
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (V)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
0.1	72.75	68.24	69.16
0.4	76.08	78.09	73.16
0.7	89.86	86.46	78.93

4.4 ศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ที่ใช้ในการกำจัดไอออนออกจากน้ำ

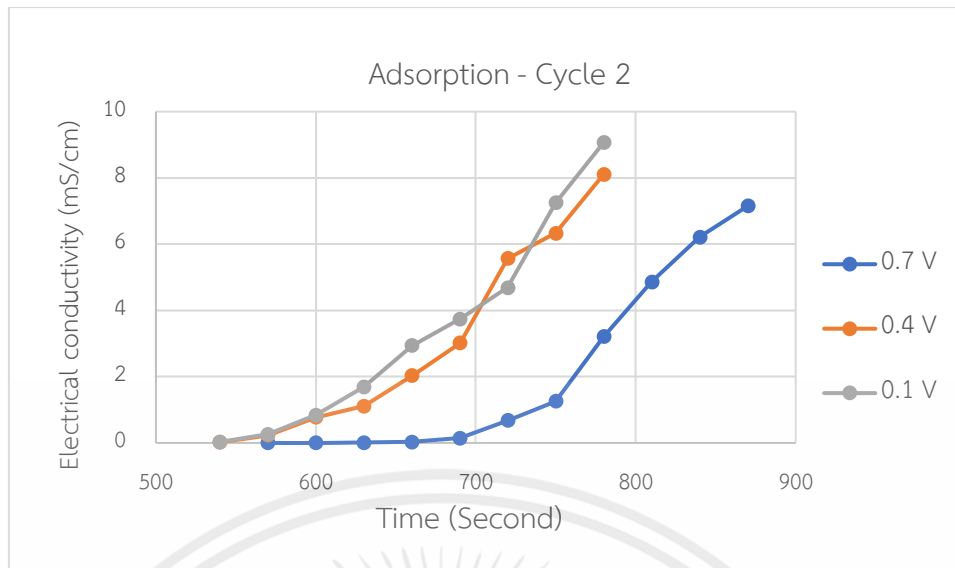
การศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0.1 0.4 และ 0.7 V โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 0.3 M และอัตราการไหล 15 ml/min จะพิจารณาภายใต้ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

จากการศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดไอออนออกจากน้ำพบว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายลดลงมากที่สุด และจากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ณ เวลาเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ค่าการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V มีค่าต่ำสุด และมีระยะเวลาในการดูดซับมากที่สุด จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะเห็นได้ว่าในรอบการดูดซับ 2 และ 3 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 V และ 0.4 V มีค่าการนำไฟฟ้าและระยะเวลาในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V มีค่าการนำไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดและมีระยะเวลาในการดูดซับมากที่สุด

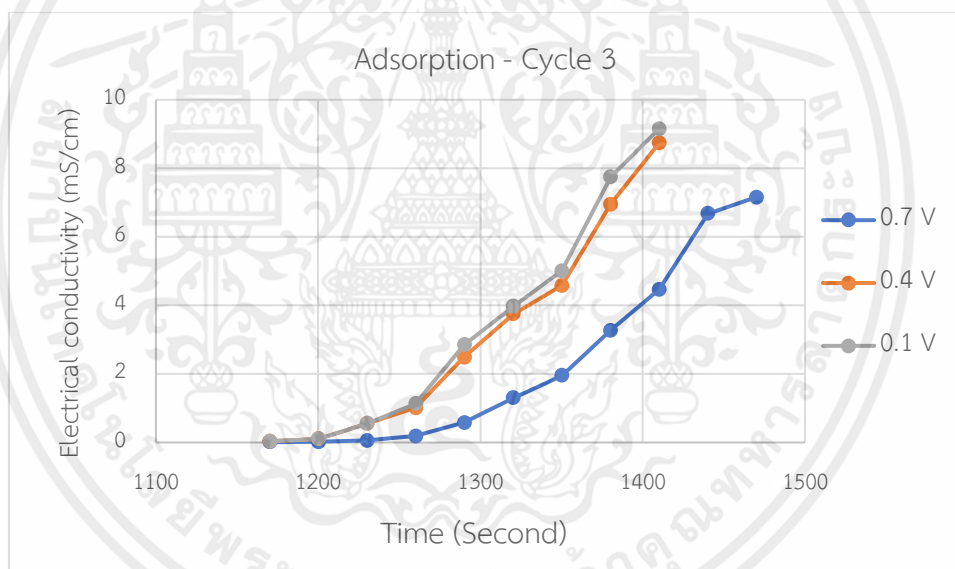


รูปที่ 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V ของกระบวนการดูดซับในรอบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



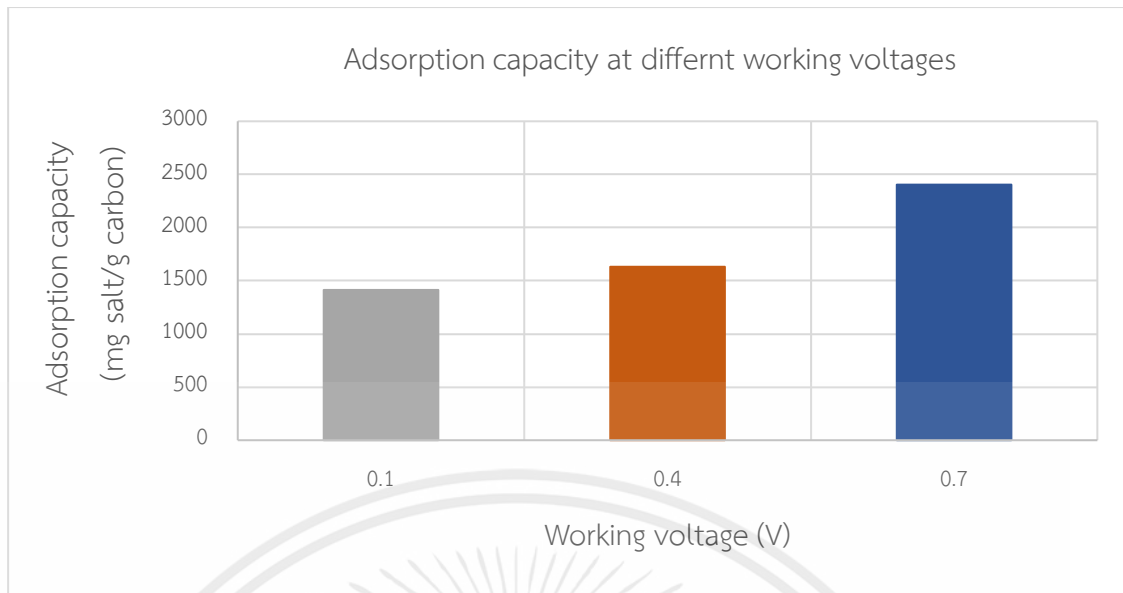
รูปที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V ของกระบวนการดูดซับในรอบที่ 2



รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V ของกระบวนการดูดซับในรอบที่ 3

จากผลการทดลอง เมื่อนำผลรวมค่าความสามารถการดูดซับที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0.1 0.4 และ 0.7 V มาเปรียบเทียบกับ ซึ่งพบว่าค่าความสามารถการดูดซับเท่ากับ 1,413.76 1,631.69 และ 2,404.20 $\text{mg}_{\text{salt}}/\text{g}_{\text{carbon}}$ ตามลำดับ ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0.7 V มีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด แสดงผลดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลรวมค่าความสามารถการดูดซับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำโดยความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยมุ่งศึกษาหลักการทำงานของกระบวนการ ศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดและศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำ เพื่อหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถแยกไอออนออกจากน้ำได้ดีที่สุด โดยเริ่มต้นจากการออกแบบ CDI stack ที่ใช้ในการทดลอง เตรียมกราฟมาตรฐานโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 1 M เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายเกลือ และจัดเตรียมอิเล็กโทรด โดยผสมผงถ่านกัมมันต์กับสารยึดเกาะพอลิเมอร์ PVDF เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับจะได้อิเล็กโทรดด้านแคโทด และนำอิเล็กโทรดด้านแคโทดไปเคลือบด้วยซิลเวอร์เพื่อเพิ่มประจุบวกให้กับอิเล็กโทรดจะได้อิเล็กโทรดด้านแอโนด หลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 0.4 และ 0.7 V

จากการทดลองการกำจัดไอออนออกจากน้ำโดยความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V ส่งผลให้อิเล็กโทรดสามารถแยกไอออนออกจากน้ำได้ดีที่สุด โดยมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ $2,404.20 \text{ mg}_{\text{salt}}/\text{g}_{\text{carbon}}$ และมีประสิทธิภาพการดูดซับถึง 85% ประสิทธิภาพที่รองลงมาได้แก่ 0.4 และ 0.1 V เมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V ทำให้อิเล็กโทรดมีระยะเวลาในการดูดซับนานที่สุด โดยมีระยะเวลาการดูดซับเท่ากับ 4 นาที ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 V เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำมากที่สุด นอกจากนี้พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกไอออนออกจากน้ำส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของอิเล็กโทรด เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับของอิเล็กโทรดก็มีค่ามากขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการปาดสารละลายอิเล็กโทรดลงบนแผ่นทองแดง ใช้แท่งบดสารเป็นตัวปาด ทำให้บางครั้งอิเล็กโทรดมีความหนาไม่สม่ำเสมอเท่าที่ต้องการ และบางครั้งเสี่ยงต่อการแตก ดังนั้นจึงควรมีแผ่นสแตนเลสสำหรับปาดสารละลายอิเล็กโทรดโดยตรง เพื่อให้ได้อิเล็กโทรดที่เรียบและสวยงาม
2. แผ่นทองแดงที่เป็นตัวรับกระแส (Current collector) มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ผิวเรียบ และหักงอได้ง่าย ในขณะที่จัดเตรียมทำให้อิเล็กโทรดมีโอกาสแตกและหลุดออกมาจากแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดงหากมีการกระทบกระเทือนที่รุนแรง ดังนั้นควรมีตัวยึดเกาะแผ่นทองแดงให้เรียบมากขึ้นเมื่ออยู่ในขั้นตอนการจัดเตรียมอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กโทรดแตก

3. ในการทำการทดลอง เนื่องจาก CDI stack มีขนาดเล็ก จึงทำให้ปริมาณน้ำที่ได้มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโพรบวัดค่าการนำไฟฟ้า เมื่อมีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายขาออก จึงทำให้ต้องใช้เวลาและมือที่นิ่งมากๆ ทำให้มีโอกาสที่ค่าการนำไฟฟ้าจะคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้นจึงควรใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าที่มีขนาดของโพรบเหมาะสมกับปริมาณสารละลายที่ได้
4. เนื่องจากปัจจุบันมีการส่งเสริมกระบวนการผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลในอุตสาหกรรม จากการทดลองผู้ทดลองจึงคาดการณ์ CDI stack ที่มีขนาด 250 m² เพื่อรองรับปริมาณของน้ำทะเลได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจมีปัจจัยอื่นๆส่งผลร่วมด้วย [15]



เอกสารอ้างอิง

- [1] “สถานการณ์น้ำจืดของโลก และประเทศไทย | WWF.”
https://www.wwf.or.th/what_we_do/wetlands_and_production_landscape/freshwater/ (accessed Dec. 08, 2022).
- [2] S. Porada, R. Zhao, A. van der Wal, V. Presser, and P. M. Biesheuvel, “Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization,” *Progress in Materials Science*, vol. 58, no. 8. Elsevier Ltd, pp. 1388–1442, 2013. doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.03.005.
- [3] A. Hassanvand, G. Q. Chen, P. A. Webley, and S. E. Kentish, “A comparison of multicomponent electrosorption in capacitive deionization and membrane capacitive deionization,” *Water Res*, vol. 131, pp. 100–109, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.watres.2017.12.015.
- [4] “ถ่านกัมมันต์ activated carbon - welkinchemi,” *Welkin Enterprise*.
<https://www.welkinchemi.com/content/18427/activatedcarbon> (accessed Dec. 08, 2022).
- [5] เพ็ญพิทักษ์ ฉวีวรรณ, “ถ่านกัมมันต์”, Accessed: Dec. 08, 2022. [Online]. Available: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf
- [6] “บทที่ 2 ทฤษฎีและเหตุผล,” *มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*.
file:///C:/Users/Acer/Documents/project/ichem61259pws_ch2.pdf (accessed Dec. 08, 2022).
- [7] C. Zhang, D. He, J. Ma, W. Tang, and T. D. Waite, “Faradaic reactions in capacitive deionization (CDI) - problems and possibilities: A review,” *Water Research*, vol. 128. Elsevier Ltd, pp. 314–330, Jan. 01, 2018. doi: 10.1016/j.watres.2017.10.024.
- [8] F. C. Walsh, “Overall rates of electrode reactions. Faraday’s Laws of Electrolysis,” *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, vol. 69, no. pt 4, pp. 155–157, 1991, doi: 10.1080/00202967.1991.11870914.

- [9] C. H. Hou, J. F. Huang, H. R. Lin, and B. Y. Wang, "Preparation of activated carbon sheet electrode assisted electrosorption process," *J Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 43, no. 3, pp. 473–479, May 2012, doi: 10.1016/j.jtice.2011.12.003.
- [10] H. Yoon, J. Lee, S. Kim, and J. Yoon, "Hybrid capacitive deionization with Ag coated carbon composite electrode," *Desalination*, vol. 422, pp. 42–48, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.08.010.
- [11] Y. Zhao, Y. Wang, R. Wang, Y. Wu, S. Xu, and J. Wang, "Performance comparison and energy consumption analysis of capacitive deionization and membrane capacitive deionization processes," *Desalination*, vol. 324, pp. 127–133, Sep. 02, 2013. doi: 10.1016/j.desal.2013.06.009.
- [12] K. T. Chen, Y. C. Yang, Y. H. Yi, X. T. Zheng, and H. Y. Tuan, "A carbon ink for use in thin, conductive, non peelable, amphiphilic, antioxidant, and large-area current collector coating with enhanced lithium ion battery performance," *J Colloid Interface Sci*, vol. 598, pp. 155–165, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jcis.2021.03.146.
- [13] ข. ณาพจาก and P. / Freepik, "ค่าการนำไฟฟ้ากับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม." [Online]. Available: www.nimt.or.th
- [14] ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, "น้ำทะเล."
- [15] M. E. Suss, S. Porada, X. Sun, P. M. Biesheuvel, J. Yoon, and V. Presser, "Water desalination via capacitive deionization: What is it and what can we expect from it?," *Energy and Environmental Science*, vol. 8, no. 8. Royal Society of Chemistry, pp. 2296–2319, 2015. doi: 10.1039/c5ee00519a.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนการทำอิเล็กทรอนิกส์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของอิเล็กโทรดคาร์บอน



รูปที่ ก.1 PVDF NMP และถ่านกัมมันต์ ผสมให้เข้ากันด้วยโกร่งบดสาร จนได้สารละลายอิเล็กโทรด



รูปที่ ก.2 ปาดสารละลายอิเล็กโทรดลงบนแม่พิมพ์ให้มีขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$



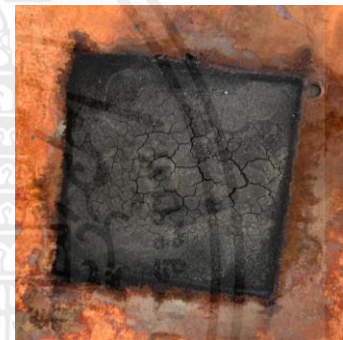
รูปที่ ก.3 สารละลายอิเล็กโทรดหลังจากอบในเตาอบ $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้แผ่นอิเล็กโทรด



รูปที่ ก.4 อิเล็กโทรดหลังจากอบในตู้อบสุญญากาศที่ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ ก.5 อิเล็กโทรดหลังจากแช่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 1 M เป็นเวลา 30 นาที และนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ ก.6 อิเล็กโทรดหลังจากแช่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) ความเข้มข้น 50 mM เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปจุ่มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 10 วินาที และนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.ค่าจากการทดลองการนำไฟฟ้าในกระบวนการกำจัดไอออนออกจากน้ำ

ตารางที่ ข.1 ค่าการนำไฟฟ้าในกระบวนการดูดซับ รอบที่ 1

เวลา (s)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)		
	0.1	0.4	0.7
0	9.25	9.25	9.25
30	0.0231	0.0017	0.0002
60	0.1645	0.0342	0.0008
90	0.6402	0.1118	0.0054
120	1.507	0.3834	0.0162
150	2.521	1.012	0.2548
180	3.138	2.213	0.6416
210	4.225	3.562	0.9377
240	5.003	4.885	2.632
270	6.76	6.74	4.154
300	8.02	7.02	6.53
330	9.11	7.96	7.67

ตารางที่ ข.2 ค่าการนำไฟฟ้าในกระบวนการคายซับ รอบที่ 1

เวลา (s)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)		
	0.1	0.4	0.7
360	0.0066	0.0075	0.0112
390	0.0173	0.0129	0.1173
420	0.0542	0.0943	0.0658
450	0.0985	0.1027	0.0103
480	0.0171	0.023	0.0047
510	0.0029	0.0045	0.0003
540	0.0006	0.0012	-
570	0.0004	0.0003	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ค่าการนำไฟฟ้าในกระบวนการดูดซับ รอบที่ 2

เวลา (s)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)		
	0.1	0.4	0.7
540	-	-	9.25
570	-	-	0.0003
600	9.25	9.25	0.001
630	0.0302	0.0162	0.0135
660	0.2605	0.2365	0.0325
690	0.8416	0.7763	0.1427
720	1.691	1.1146	0.6813
750	2.938	2.027	1.252
780	3.742	3.012	3.209
810	4.683	5.57	4.863
840	7.25	6.33	6.21
870	9.07	8.11	7.15

ตารางที่ ข.4 ค่าการนำไฟฟ้าในกระบวนการคายซับ รอบที่ 2

เวลา (s)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)		
	0.1	0.4	0.7
900	0.0098	0.0113	0.0141
930	0.0251	0.0297	0.0426
960	0.0322	0.0346	0.0557
990	0.0098	0.0093	0.0103
1020	0.0042	0.0041	0.0056
1050	0.0023	0.0025	0.0014
1080	0.0009	0.0011	0.0005
1110	0.0005	0.0004	0.0003
1140	0.0005	0.0005	-
1170	0.0004	0.0005	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ค่าการนำไฟฟ้าในกระบวนการดูดซับ รอบที่ 3

เวลา (s)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)		
	0.1	0.4	0.7
1140	-	-	9.25
1170	-	-	0.0049
1200	9.25	9.25	0.0188
1230	0.0401	0.0377	0.0536
1260	0.1054	0.0982	0.1845
1290	0.5556	0.5474	0.576
1320	1.132	1.006	1.297
1350	2.853	2.483	1.949
1380	3.967	3.746	3.272
1410	5.01	4.58	4.463
1440	7.74	6.95	6.68
1470	9.15	8.73	7.16

ตารางที่ ข.6 ค่าการนำไฟฟ้าในกระบวนการคายซับ รอบที่ 3

เวลา (s)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)		
	0.1	0.4	0.7
1500	0.0044	0.005	0.0075
1530	0.0098	0.0111	0.0164
1560	0.0031	0.0076	0.0381
1590	0.0025	0.0043	0.0101
1620	0.0019	0.0018	0.0067
1650	0.0012	0.0014	0.0023
1680	0.0006	0.001	0.0009
1710	0.0006	0.0007	0.0005
1740	0.0005	0.0005	0.0003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ค่าความเข้มข้นของสารละลาย

ตารางที่ ข.7 ค่าความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการดูดซับ รอบที่ 1

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (mol/L)		
	0.1	0.4	0.7
0	0.33121	0.33121	0.33121
30	0.00001	0.00006	0.00083
60	0.00003	0.00122	0.00589
90	0.00019	0.00400	0.02292
120	0.00058	0.01373	0.05396
150	0.00912	0.03624	0.09027
180	0.02297	0.07924	0.11236
210	0.03358	0.12754	0.15128
240	0.09424	0.17491	0.18988
270	0.14874	0.24133	0.24205
300	0.23382	0.25136	0.28717
330	0.27463	0.28502	0.32620

ตารางที่ ข.8 ค่าความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการคายซับ รอบที่ 1

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (mol/L)		
	0.1	0.4	0.7
360	0.0066	0.00027	0.00040
390	0.0173	0.00046	0.00420
420	0.0542	0.00338	0.00236
450	0.0985	0.00368	0.00037
480	0.0171	0.00082	0.00017
510	0.0029	0.00024	0.00001
540	0.0006	0.00004	-
570	0.0004	0.00001	-

ตารางที่ ข.9 ค่าความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการดูดซับ รอบที่ 2

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (mol/L)		
	0.1	0.4	0.7
540	-	-	0.33121
570	-	-	0.00001
600	0.33121	0.33121	0.00004
630	0.00108	0.00058	0.00048
660	0.00933	0.00847	0.00116
690	0.03013	0.02780	0.00511
720	0.06055	0.03991	0.02439
750	0.10520	0.07258	0.04483
780	0.13399	0.10785	0.11490
810	0.20349	0.19944	0.17413
840	0.25960	0.22665	0.22236
870	0.32476	0.29039	0.25602

ตารางที่ ข.10 ค่าความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการคายซับ รอบที่ 2

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (mol/L)		
	0.1	0.4	0.7
900	0.00035	0.00040	0.00050
930	0.00090	0.00106	0.00153
960	0.00115	0.00124	0.00199
990	0.00035	0.00033	0.00037
1020	0.00015	0.00015	0.00020
1050	0.00008	0.00009	0.00005
1080	0.00003	0.00004	0.00002
1110	0.00002	0.00001	0.00001
1140	0.00002	0.00002	-
1170	0.00001	0.00002	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ค่าความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการดูดซับ รอบที่ 3

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (mol/L)		
	0.1	0.4	0.7
1140	-	-	0.33121
1170	-	-	0.00018
1200	0.33121	0.33121	0.00067
1230	0.00144	0.00135	0.00192
1260	0.00377	0.00352	0.00661
1290	0.01989	0.01960	0.02062
1320	0.04053	0.03602	0.04644
1350	0.10216	0.08891	0.06979
1380	0.14204	0.13413	0.11716
1410	0.17939	0.16399	0.15980
1440	0.27714	0.24885	0.23919
1470	0.32763	0.31259	0.25637

ตารางที่ ข.12 ค่าความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการคายซับ รอบที่ 3

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (mol/L)		
	0.1	0.4	0.7
1500	0.00016	0.00018	0.00027
1530	0.00035	0.00040	0.00059
1560	0.00011	0.00027	0.00136
1590	0.00009	0.00015	0.00036
1620	0.00007	0.00006	0.00024
1650	0.00004	0.00005	0.00008
1680	0.00002	0.00004	0.00003
1710	0.00002	0.00003	0.00002
1740	0.00002	0.00002	0.00001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การคำนวณความสามารถการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับ

หลังจากได้ความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการดูดซับ เราสามารถคำนวณความสามารถดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับได้จากสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.33121 M ความเข้มข้นขาออกของสารละลาย 0.03358 M ระยะเวลาในการดูดซับ 210 s มวลของตัวดูดซับ 1.08 g และอัตราการไหล 15 ml/min

คำนวณความสามารถการดูดซับ

$$\begin{aligned}
 Q &= \left[\frac{\int_0^{210} (0.33121 - 0.03358) dt}{1.08} \right] \cdot \frac{15}{60} \\
 &= \left[\frac{\int_0^{210} 0.29763 dt}{1.08} \right] \cdot 0.25 \\
 &= 14.4683 \text{ mmol}_{\text{salt}} / \text{g}_{\text{carbon}} \\
 &= 846.3944 \text{ mg}_{\text{salt}} / \text{g}_{\text{carbon}}
 \end{aligned}$$

คำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\begin{aligned}
 \text{EFF} &= \frac{0.33121 - 0.03358}{0.33121} \\
 &= 0.8986
 \end{aligned}$$

ดังนั้นที่ความเข้มข้นขาออกของสารละลาย 0.03358 M มีความสามารถการดูดซับ $14.4683 \text{ mmol}_{\text{salt}} / \text{g}_{\text{carbon}}$ และมีประสิทธิภาพการดูดซับ 89.86%