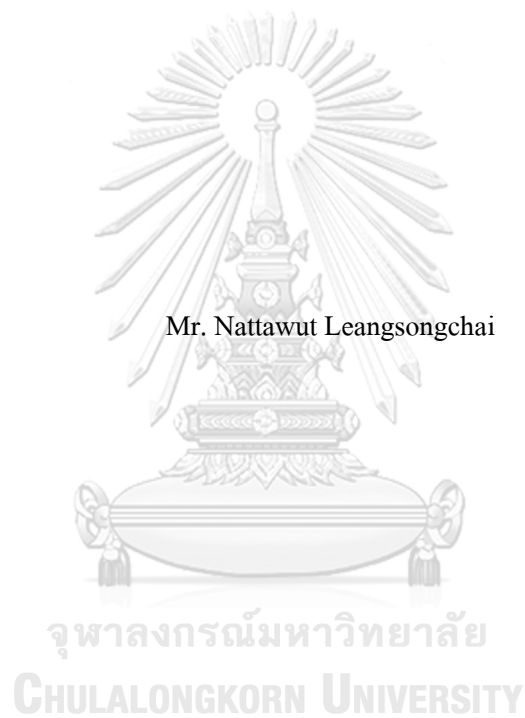


ผลของสัปดาห์โดยมวลของโพแทสเซียมไอโอไดด์/ไอโอดีนต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนแบบอัดประจุซ้ำได้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of potassium iodide/iodine mass ratio on performance of Rechargeable zinc-iodine
batteries.



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของสัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไอโอไดด์/
ไอโอดีนต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนแบบ
อัดประจุซ้ำได้

โดย

นายณัฐวุฒิ เหลืองทรงชัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมคูสิต)

ประธานกรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ สมหวังชนโรจน์)

กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี)

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

ณัฐวุฒิ เหลืองทรงชัย : ผลของสัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไอโอไดด์/ไอโอดีน ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนแบบอัดประจุซ้ำได้. (Effects of potassium iodide/iodine mass ratio on performance of Rechargeable zinc-iodine batteries.) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สุรเทพ เขียวหอม

แบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนแบบอัดประจุซ้ำได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับกักเก็บพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากไอโอดีนที่ใช้เป็นขั้วแคโทดมีความจุจำเพาะสูง ราคาถูก สามารถหาได้ง่าย และมีความปลอดภัยในการใช้งาน อย่างไรก็ตามแคโทดไอโอดีนยังคงมีปัญหาบางประการเช่น การนำไฟฟ้าต่ำ ระเหิดได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง และมีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ อีกทั้งไตรไอโอไดด์ไอออนที่เกิดขึ้นระหว่างการอัด-คายประจุยังสามารถทำให้แผ่นสังกะสีที่ใช้เป็นขั้วแอโนดเกิดการผุกร่อนได้ ซึ่งปัญหาเหล่านี้เองทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำคาร์บอนกัมมันต์มาใช้ในการเป็นวัสดุคูดซับไอโอดีนเพื่อป้องกันการถูกกัดกร่อนของขั้วสังกะสี และนำโพแทสเซียมไอโอไดด์มาใช้เพิ่มความสามารถในการละลายของไอโอดีนในน้ำ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีนที่สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนและศึกษากลไกการดูดซับไอโอดีนบนคาร์บอนกัมมันต์ วัสดุแคโทดถูกเตรียมโดยการผสมสารละลายไอโอดีน 40% คาร์บอนกัมมันต์ 40% คาร์บอนนำไฟฟ้า 10% และสารยึดเกาะ 10% โดยน้ำหนัก และประยุกต์ใช้ในเซลล์แบตเตอรี่ CR2025 จากนั้นทำการตรวจสอบทั้งในด้านของคุณลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ไตรไอโอไดด์ไอออนเป็นตัวถูกดูดซับลงบนคาร์บอนกัมมันต์และไม่เกิดพันธะระหว่างคาร์บอนกับไอโอดีน สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีนในการใช้งานแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนคือสัดส่วน 1:1 โดยจะมีค่าความจุที่กระแส 1C สูงถึง 184 mAh/ g มีประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุเท่ากับ 99.37% และมีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานเท่ากับ 86.79% อีกทั้งยังสามารถใช้งานที่กระแสสูงถึง 6Cและมีอายุการใช้งานยาวนานมากกว่า 1000 รอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170168021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Zinc-iodine batteries, Potassium iodide, Iodine

Nattawut Leangsongchai : Effects of potassium iodide/iodine mass ratio on performance of Rechargeable zinc-iodine batteries.. Advisor: Assoc. Prof. SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D.

Rechargeable zinc-iodine batteries are very interesting to use as electrical energy-storage (EES), being low cost and having high abundance. They also have high specific capacity as well as high safety. However, when applied as a cathode material, an iodine cathode still has some issues i.e. very low electrical conductivity, easy sublimation at room temperature and low solubility in water. In addition, the tri-iodide ions (I_3^-) formed during charge-discharge can cause the zinc (Zn) used as an anode to corrode. These problems impede the efficiency of Zn-iodine batteries. In this research, activated carbon (C) is used as an iodine absorption material to prevent Zn anode corrosion and potassium iodide (KI) is used to increase the solubility of iodine in water. The proportion of KI to iodine is compared to the ratio of 1: 1, 1: 2, and 2: 1 in order to find the optimal ratio of Zn-iodine battery and study the mechanism of iodine uptake on the activated C. The cathode material was prepared by mixing 40wt% iodine solution, 40wt% activated C, 10wt% conductive C, and 10wt% binder and applied in a CR2025 battery cell. Then the characteristics and electrical properties were analyzed. The results show that I_3^- are absorbed onto the activated C and no carbon-iodine bond is formed. The optimum ratio of KI to iodine in the Zn-iodine battery is 1: 1 with specific discharge capacity of 1C up to 184 mAh/g C, coulombic efficiency (CE) of 99.37%, and round-trip efficiency of 86.79%. The battery can be used at high current (6C) and has a long cycle life of more than 1000 cycles.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จร่ว่งไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาอย่างสูงจากคณาจารย์และผู้เชี่ยวชาญทั้งหลายที่คอยให้ความช่วยเหลือ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุรเทพ เจียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาคำแนะนำรวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สราวุธ ริมคูสิต เป็นอย่างสูงที่กรุณารับเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อนงค์นาฏ สมหวังชนโรจน์ เป็นอย่างสูงที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย บำรุงศรี เป็นอย่างสูงที่กรุณารับเป็นกรรมการภายนอกสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ คณ. วรัญญู ก้าวเอียน ที่ให้ความรู้และทักษะในการใช้งานเครื่องมือ รวมถึงความช่วยเหลือ คำแนะนำและคำปรึกษามาโดยตลอด

ขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้งานสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่มอบโอกาสในการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณัฐวุฒิ เหลืองทรงชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการทดลอง	2
1.4 ตารางแผนงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน (Zinc iodine batteries).....	5
2.1.1 ภาพรวมของแบตเตอรี่ (Overview)	5
2.1.2 ขั้วสังกะสีอิเล็กโทรด (Zinc electrode)	7
2.2.3 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)	7
2.2.4 แผ่นกั้น (Separator).....	7
2.2.5 ไอโอดีนอิเล็กโทรด (Iodine electrode)	8
2.2 คาร์บอนรูพรุน (Porous carbon)	9
2.3 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose (Na-CMC)).....	9
2.4 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide).....	10

2.5 เครื่องมือและเทคนิคการวิเคราะห์	11
2.5.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry).....	11
2.5.2 เทคนิคอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy).....	12
2.5.3 เทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic).....	12
2.5.4 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope)	13
2.5.5 เทคนิคบรูว์นอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller (BET))	14
2.5.6 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)	14
บทที่ 3 ระเบียบงานวิจัย.....	16
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ในงานวิจัย	16
3.2 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์	17
3.3 การเตรียมขั้วแคโทด	17
3.4 การประกอบแบตเตอรี่.....	17
3.5 การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical Test)	18
3.5.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry).....	18
3.5.2 เทคนิคอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy).....	18
3.5.3 เทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic).....	18
3.6 การทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization Test)	18
3.6.1 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope)	18
3.6.2 เทคนิคบรูว์นอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller (BET)).....	19
3.6.3 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)	19
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	20
4.1 ผลการขึ้นรูปขั้วแคโทดของแบตเตอรี่	20
4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization Test).....	21

4.2.1 ผลการศึกษาพื้นฐานของอนุภาค โครงสร้างผลึกและการกระจายตัวของอนุภาคบนขั้ว แคโทด.....	21
4.2.2 ผลการทดลองหาค่าไอโอดีน (Iodine Number) ของคาร์บอนกัมมันต์	22
4.2.3 ผลการทดสอบหาพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET)	23
4.2.4 ผลการทดสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	24
4.3 ผลทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical Test).....	25
4.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic).....	25
4.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry)	29
4.3.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy).....	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	33
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	33
5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization Test).....	33
5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical Test).....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	34
ภาคผนวก	36
บรรณานุกรม	41
ประวัติผู้เขียน	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของข้าวแคโทด.....	3
ตารางที่ 2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์.....	16
ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยบรูนัวร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (BET).....	24



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ส่วนประกอบพื้นฐานและการทำงานของเซลล์สังกะสีไอโอดีน.....	5
รูปที่ 2 แบบจำลองการปฏิกิริยาของแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน.....	6
รูปที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC).....	10
รูปที่ 4 แสดงไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	11
รูปที่ 5 องค์ประกอบของแบตเตอรี่แบบเหรียญ.....	17
รูปที่ 6 ขั้วแคโทดที่ทำการสังเคราะห์ ก) ขั้วที่นำไปใช้ประกอบแบตเตอรี่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ข) ขั้วแบตเตอรี่หลังทำการขึ้นรูป.....	21
รูปที่ 7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานของอนุภาคและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I ₂) ก) 1:1 ค) 1:2 จ) 2:1 ก่อนทำการอัด-คายประจุ และ ข) 1:1 ง) 1:2 ฉ) 2:1 หลังทำการอัด-คายประจุ 100 รอบ.....	22
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมไอโอดีน (Iodine Absorb) กับ ความเข้มข้นของไอโอดีน.....	23
รูปที่ 9 ผลรามสเปกตรัม (Raman Spectrum) ของขั้วแคโทด.....	24
รูปที่ 10 ค่าคายความจุ (Specific Discharge Capacity) ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I ₂) 1:1, 1:2 และ 2:1 ที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C.....	26
รูปที่ 11 ก) ผลค่าคายความจุ (Specific Discharge Capacity) ขณะทำการทดสอบที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C ข) ค่าคายประจุคงเหลือ (Capacity Retention) เมื่อเทียบกับกระแส 1C ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I ₂) 1:1.....	26
รูปที่ 12 ก) แสดงประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ (Columbic Efficiency) ในแต่ละรอบการทดสอบของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I ₂) 1:1 ข) KI:I ₂ =1:2 ค) KI:I ₂ = 2:1 ง) แสดงประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน (Round-Trip Efficiency) ในแต่ละรอบการทดสอบของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I ₂) 1:1 ข) 1:2 ค) 2:1 ที่กระแส 4C.....	28

รูปที่ 13 แสดงค่าคายประจุคงเหลือ (Capacity Retention) เมื่อเทียบกับการใช้งานรอบที่สอง ณ การใช้งานรอบที่ 1000 ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1 ที่กระแส 4C28

รูปที่ 14 แสดงค่าการคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยตัวเอง (Self Discharge) ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1.....29

รูปที่ 15 กราฟโวลแทจเมตริในช่วง 0.7-1.7 โวลต์ อัตราสแกน (Scan rate) 5, 10 และ 50 mV/s ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน ก) 1:1 ข) 1:2 ค) 2:1 ง) แสดงผลการเปรียบเทียบโวลแทจเมตริของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีนแต่ละสัดส่วนที่อัตราสแกน 5 mV/s จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสสูงสุด กับ รากที่สองของอัตราสแกน.....30

รูปที่ 16 กราฟอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนที่ความถี่เริ่มต้น 200 กิโลเฮิร์ตส์ (kHz) ถึง 10 มิลลิเฮิร์ตส์ (mHz) ของแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน ก) ไนควิสต์ (Nyquist) ข) โบดี (Bode).....32

รูปที่ 17 ไอโซเทอมของการดูดซับ ก) ขั้วแคโทดที่ไม่มีไอโอดีน ข) ขั้วแคโทดที่ดูดซับไอโอดีนแล้ว.....40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานหมุนเวียน (renewable energy) มีอยู่มากมาย เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานจากแสงอาทิตย์ และในปัจจุบันพลังงานเหล่านี้ได้ได้รับความสนใจมากขึ้น และมีสัดส่วนในการใช้พลังงานเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แต่การผลิตและใช้งานพลังงานเหล่านี้ยังมีปัญหาอยู่ โดยปัญหาเหล่านั้นก็คือ ความผันผวนของการผลิตพลังงานในช่วงเวลาต่างๆ อย่าง เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ดังนั้นจึงไม่สามารถผลิตพลังงานได้อย่างคงที่ ทำให้บางช่วงเวลาอาจมีไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นเราจึงต้องการระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy storage) [1] เพื่อทำหน้าที่กักเก็บและปล่อยพลังออกมาได้ในช่วงระยะเวลาที่ไม่สามารถผลิตได้ตามความต้องการ

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage) ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แบตเตอรี่ที่ใช้ใน โทรศัพท์มือถือ วิทยุ นาฬิกาข้อมือ หรือคอมพิวเตอร์แบบพกพา รวมทั้งรถยนต์ไฟฟ้า (electric vehicles) ระบบกักเก็บพลังงานในปัจจุบันที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (lithium-ion battery) แม้ว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีพลังงานและความหนาแน่นของพลังงานสูง อีกทั้งยังสามารถอัดประจุซ้ำได้ (rechargeable batteries) แต่ก็มีข้อจำกัดในด้าน ต้นทุน ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม [2] ดังนั้นนักวิจัยหลายคนได้ทำการแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนไปใช้วัสดุอื่นๆ เช่น สังกะสี (Zn) [3], แคลเซียม (Ca) [4], หรือแมกนีเซียม (Mg) [5, 6] แทนลิเทียมในด้านของแอโนด [3] เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีต้นทุนต่ำ ปลอดภัย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากคือ สังกะสี เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ความหนาแน่นของพลังงานสูง ($5,888 \text{ mAh/cm}^3$) [3] และมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่เหล่านี้เช่น แบตเตอรี่ แบตเตอรี่สังกะสี-อากาศ (zinc-air battery) แบตเตอรี่สังกะสีไอออน (zinc-ion battery) มีประสิทธิภาพในการอัดประจุซ้ำและอายุการใช้งานไม่มากนัก ดังนั้นนักวิจัยหลายคนได้เสนอวิธีการต่างๆ ในการแก้ไขปัญหานี้และเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่โลหะ-ไอโอดีน (Metal-iodine batteries) เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง ต้นทุนต่ำ และสามารถหาได้ง่าย เมื่อเร็ว ๆ นี้แบตเตอรี่โลหะ-ไอโอดีนต่างๆ (Na-I_2 , Mg-I_2 , Al-I_2) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น แบตเตอรี่โลหะไอโอดีนซึ่งใช้น้ำเป็น

อิเล็กโทรไลต์ (Aqueous metal-iodine batteries) เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีความปลอดภัยสูงและค่าใช้จ่ายของอิเล็กโทรไลต์ต่ำเนื่องจากเป็นอิเล็กโทรไลต์ฐานน้ำ (aqueous electrolytes) [7] อีกทั้งยังสามารถใช้ แอโนดโลหะ แคโทดฮาโลเจน และอิเล็กโทรไลต์น้ำร่วมกันได้ [8] โลหะสังกะสีเป็นแอโนดที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงและมีความเสถียรในน้ำเมื่อเทียบกับลิเทียม แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนมีความปลอดภัยสูงและราคาไม่แพง อย่างไรก็ตาม แคโทดไอโอดีนพบปัญหาหลายอย่างเช่น การนำไฟฟ้าต่ำมาก (ประมาณ 10^{-9} S cm^{-1}), สามารถระเหิดได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องและความสามารถในการละลายของ I_2 ในน้ำมีค่าต่ำ [2] ดังนั้นการเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ลงไปจะทำให้ไอโอดีนทำปฏิกิริยากับไอโอไดด์ไอออนกลายเป็นไตรไอโอไดด์ไอออนซึ่งสามารถละลายน้ำได้

แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนมีปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งคือ ไตรไอโอไดด์ไอออน (I_3^-) ไตรไอโอไดด์ไอออนจะกัดกร่อนสังกะสีแอโนดส่งผลให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง การวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีรายงานว่าการใช้คาร์บอนรูพรุนสามารถยับยั้งการกัดกร่อนของไตรไอโอไดด์ไอออนได้ [3] อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย [3, 8, 9] อย่างไรก็ตาม การรายงานผลของงานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่มีการศึกษาถึงกลไกในการถูกดูดซับลงบนคาร์บอนรูพรุนของไอโอดีน

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงทำการหาอัตราส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ต่อ ไอโอดีน (I_2) ที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ในแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน และศึกษากลไกการถูกดูดซับลงบนคาร์บอนรูพรุนของไอโอดีน ด้วยแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนแบบชาร์จประจุได้ (Rechargeable zinc-iodine batteries) โดยจะทำการวิเคราะห์ทั้งในด้าน ความสามารถในการเก็บประจุ ความหนาแน่นของพลังงาน เสถียรภาพ และอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบในเชิงสมรรถนะของแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน โดยใช้สัดส่วนที่แตกต่างกันของโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) และ ไอโอดีน (I_2)
- 2) เพื่อศึกษากลไกการดูดซับ ไอโอดีนบนคาร์บอนกัมมันต์

1.3 ขอบเขตการทดลอง

- 1) ใช้แผ่นสังกะสีและผงสังกะสีเป็นขั้วแอโนด
- 2) ใช้ซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) เข้มข้น 2M เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- 3) ใช้กระดาษกรองใยแก้ว (Glass microfiber paper) เป็นแผ่นกั้น

- 4) สังเคราะห์ขั้วแคโทดโดยใช้สัดส่วนที่ระบุในตาราง 1.1 และทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ต่อ ไอโอดีน (I_2) ที่ 2:1, 1:1 และ 1:2 โดยน้ำหนัก
- 5) ทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของขั้วแคโทดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูการกระจายตัวและโครงสร้างของวัสดุ และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์ ตรวจสอบปริมาณของไอโอดีนสายพันธุ์ต่างๆ
- 6) ทำการขึ้นรูปแบตเตอรี่ในรูปแบบของเซลล์เหรียญ (coin cell) และทำการทดสอบสมรรถนะในเชิงความสามารถในการเก็บประจุ, ความหนาแน่นพลังงาน และ เสถียรภาพ(columbic eff)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของขั้วแคโทด

วัสดุ	สัดส่วน (% โดยน้ำหนัก)
คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon)	40
โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) และ ไอโอดีน (I_2)	40
ตัวนำช่วยในการไฟฟ้า (conducting agent)	10
ตัวประสาน (binder)	10

บทที่ 2

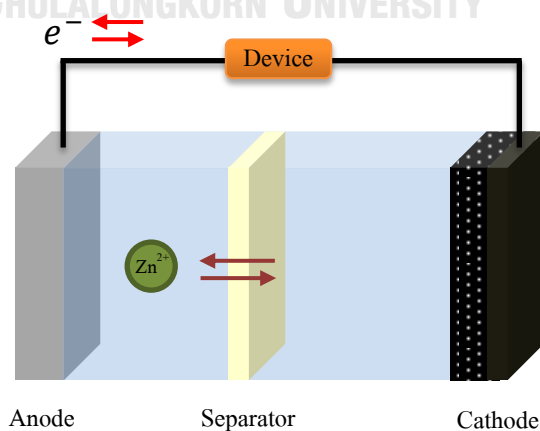
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน (Zinc iodine batteries)

2.1.1 ภาพรวมของแบตเตอรี่ (Overview)

อุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นเอง เรียกว่า เซลล์ไฟฟ้า (Electrochemical cell) หรือเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เซลล์กัลวานิก ประกอบด้วยขั้วแอโนดและแคโทดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วแอโนดคือขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ขั้วแคโทดคือขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางให้อิออนระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดสามารถผ่านได้ ในขณะที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดผ่านวงจรภายนอก

แบตเตอรี่มีหลักการในการทำงานคล้ายกับเซลล์กัลวานิก กล่าวคือ แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดโดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลาง แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนถูกรายงานครั้งแรกในปี 1980 [1] แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนประกอบด้วย ขั้วแอโนด, แผ่นกั้น, ขั้วแคโทด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังแสดงในรูป 2.1 [10]

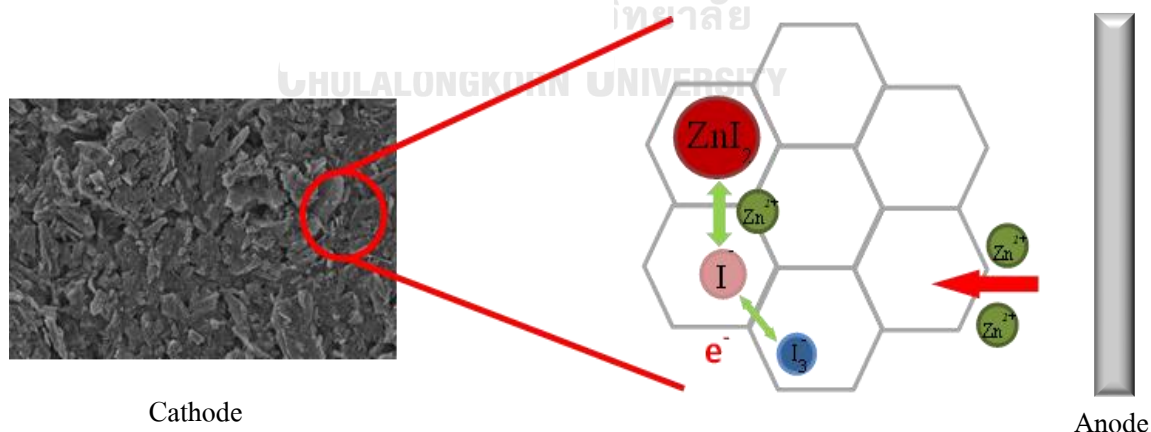


รูปที่ 1 ส่วนประกอบพื้นฐานและการทำงานของเซลล์สังกะสีไอโอดีน

เมื่อทำการคายประจุ (Discharge) ขั้วแอโนดจะปล่อยอิเล็กตรอนไปยังวงจรอุปกรณ์ภายนอก (External device circuit) เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) แสดงในสมการที่ 2.1 ในขณะที่ขั้วแคโทดจะรับอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วแอโนด เรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) แสดงในสมการที่ 2.2 ในทางตรงกันข้าม เมื่อทำการอัดประจุ (Charge) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะกลับด้านในขั้วไฟฟ้าเดียวกัน ในทางทฤษฎีศักย์ภาพเซลล์มาตรฐานของแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน คือ 1.3 โวลต์ และมีปฏิกิริยาตามสมการ 2.3



ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในรูพรุนของคาร์บอนดังรูปที่ 2.2 คือ ในขณะที่ทำการปล่อยกระแส แผ่นสังกะสีจะแตกตัวได้ Zn^{2+} และ e^- จากนั้น Zn^{2+} จะเข้ามาในรูพรุนของคาร์บอนและทำปฏิกิริยากับ I^- ที่เกิดจากการรับ e^- ของ I_2 กลายเป็น ZnI_2 และเมื่อทำการชาร์จประจุกลับ ZnI_2 ก็จะแตกตัวเป็น I^- และ Zn^{2+} จากนั้น Zn^{2+} จะเคลื่อนที่กลับไปขั้วแอโนด ส่วน I^- จะให้ e^- และกลายเป็น I_2 ซึ่งจะถูกกักอยู่ในคาร์บอนกัมมันต์



รูปที่ 2 แบบจำลองการปฏิกิริยาของแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน

2.1.2 ขั้วสังกะสีอิเล็กโทรด (Zinc electrode)

ขั้วไฟฟ้าสังกะสีมีข้อดีสำหรับการนำมาใช้ทำแบตเตอรี่คือ สามารถพบได้ง่าย, มีจำนวนมาก, เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, ราคาถูก ความหนาแน่นของพลังงานสูง ($5,888 \text{ mAh/cm}^3$) [3] และความสามารถในการพลิกกลับได้ดีในอิเล็กโทรไลต์น้ำ [11] ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด สังกะสีมีความสามารถในการละลายสูงและกลายเป็น Zn^{2+} ภายใต้กรดอ่อนการละลายจะช้าลงเนื่องจากเกิดการกัดกร่อนต่ำกว่า ภายใต้สารละลายด่างเล็กน้อย ($8.0 < \text{pH} < 10.5$) การละลายของสังกะสีจะลดลง ปฏิกิริยาหลักของอิเล็กโทรดสังกะสีในสารละลายกรดและกลางคือ $\text{Zn} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ ตัวอย่างแบตเตอรี่ไอโอดีนที่ใช้แผ่นสังกะสีเป็นขั้วแอโนด [1, 3, 9, 12-17]

2.2.3 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

อิเล็กโทรไลต์เป็นสื่อกลางสำหรับการเคลื่อนที่ของไอออนในแบตเตอรี่ซึ่งประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ สำหรับแบตเตอรี่สังกะสี อิเล็กโทรไลต์เป็นเหมือนแหล่งสังกะสีไอออนสำรองในรวมกลับ (Intercalation) ที่ขั้วแคโทด และการสะสมของสังกะสีที่ขั้วแอโนด โดยปกติแบตเตอรี่แบบชาร์จใหม่ได้จะใช้อิเล็กโทรไลต์กรดอ่อนและอิเล็กโทรไลต์อัลคาไลน์ (KOH หรือ NaOH) [11] อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญของอิเล็กโทรไลต์ต่างคือการละลายสูงและการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าสังกะสี ดังนั้นอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกลางหรือเป็นกรดในน้ำจะช่วยลดการก่อตัวของสังกะสี (Dendrite) ทำให้ประสิทธิภาพการชาร์จ (Coulombic efficiency) สูงและลดการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าสังกะสี ส่งผลให้มีความเสถียรในการใช้งานระยะยาว นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวมีความปลอดภัยสูงต้นทุนต่ำและการนำไอออน (Ionic conductivity) สูง สำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนแบบอัดประจุซ้ำได้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้มีการใช้อิเล็กโทรไลต์น้ำคือ ซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) [1, 3, 9]

2.2.4 แผ่นกั้น (Separator)

แผ่นกั้นมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งการสัมผัสกันระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยให้ไอออนสามารถแทรกผ่านไปได้เพื่อความเป็นกลางทางไฟฟ้า ในการศึกษาก่อนหน้าเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange membrane) เช่น เนฟิออน (Nafion) ถูกใช้สำหรับคั่นในแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนที่ชาร์จซ้ำได้ [1, 3, 13, 14, 16] อย่างไรก็ตามเนฟิออน

มีราคาแพงเกินไป Congxin Xie และคณะ [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการรักษาด้วยตนเอง (self-healing) ของแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนแบบไหล โดยใช้ KI และ $ZnBr_2$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ร่วมกับเยื่อโพลีเอเลฟินที่มีรูพรุนราคาถูกลงสามารถให้ความหนาแน่นพลังงานสูง ส่งผลให้แบตเตอรี่ไหลประสิทธิภาพสูงสามารถทำได้ อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนที่ไม่มีเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุบวกหรือเพียงแค่ใช้กระดาษกรองเป็นตัวแยกยังคงมีการศึกษา ซึ่งเป็นกรณีที่ไอโอดีนไม่ผ่านอิเล็กโทรดเชิงบวกอย่างแน่นอน [9, 17]

2.2.5 ไอโอดีนอิเล็กโทรด (Iodine electrode)

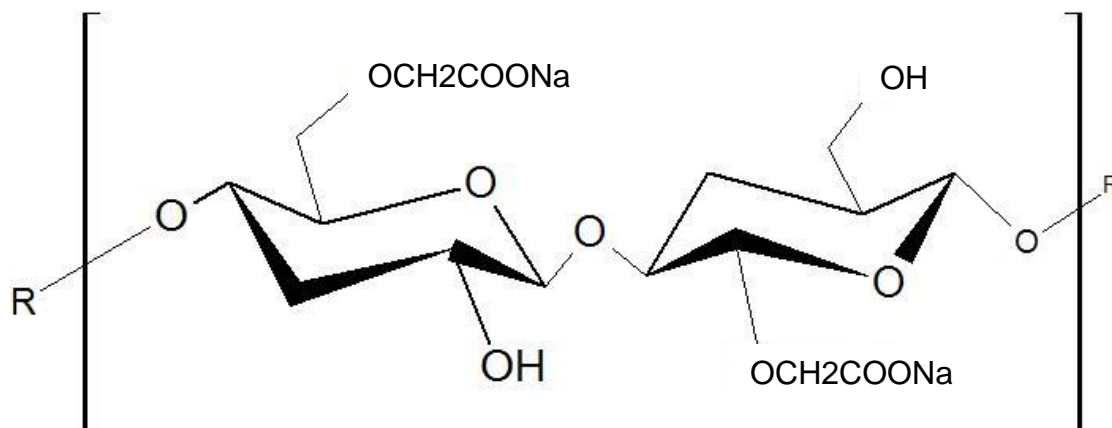
แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนแบบอัดประจุเข้าได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีสมรรถนะในการใช้งานที่ดีขึ้น เมื่อเร็ว ๆ นี้การใช้คาร์บอนรูพรุน (Porous carbon) เป็นขั้วบวกได้รับการศึกษามากขึ้น Juhan Lee และคณะ [19] รายงานระบบจัดเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่ใช้สังกะสีไอโอดีน (ZnI_2) รีดอกซ์อิเล็กโทรไลต์ (Redox electrolyte) ที่มีคาร์บอนไฟเบอร์ (ACF) เป็นแคโทดและดิสก์สังกะสีเป็นแอโนด Ke Lu และคณะ [1, 19] ได้รายงานไฮโดรเจลกราฟีนออกไซด์ซึ่งเป็นเมทริกซ์รูพรุนแบบสามมิติที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่และทางเดินไอออนง่าย อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของการหลอมสูงและมีราคาแพงมาก Chong Bai และคณะ [9] รายงานถ่านกัมมันต์นำไฟฟ้า (conductive nanoporous activated carbon) (ACC / I2) ซึ่งได้รับการปรับปรุงผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริกเจือจางและเติมไอโอดีนให้เต็มในแคโทด การใช้งานของมันคือการปรับปรุงการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตอิเล็กโทรด Yixin Li และคณะ [3] รายงานผ้าคาร์บอนกับไอโอดีน ผลคือมีความยืดหยุ่นที่ดีเยี่ยมและความทนทานเชิงกล แต่อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าต่ำ และสุดท้าย Congxin Xie และคณะ [20] และ Shota Ito และคณะ [8] ได้ใช้ผ้ากราฟไฟต์ (Graphite felt) สำหรับขั้วแคโทด ข้อดีของอิเล็กโทรดรูพรุนแบบกราฟไฟต์ 3 มิติ คือความพรุนสูงและพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ซึ่งใช้ในให้ค่าการคายประจุและอัดประจุอย่างรวดเร็วต่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตามการใช้คาร์บอนรูพรุนร่วมกับไอโอดีนบนขั้วแคโทดยังช่วยลดปัญหาการเกิดไตรไอโอดีนที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนสังกะสีบนขั้วแอโนดได้อีกด้วย [3]

2.2 คาร์บอนรูพรุน (Porous carbon)

คาร์บอนรูพรุน (Porous carbon) คือวัสดุหนึ่งที่ถูกใช้ในงานวิจัยก่อนหน้าสำหรับการใช้เป็นวัสดุแคโทดเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีน เนื่องจากสามารถป้องกันการกัดกร่อนของไตรโอะไอโอดีนไอออนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ได้ ตัวอย่างเช่น Chong Bai, และคณะ [9] รายงานถ่านกัมมันต์นำไฟฟ้า (conductive nanoporous activated carbon) (ACC / I₂) ที่สามารถปรับปรุงการนำไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้โดยมีค่าความสามารถในการเก็บประจุมากกว่า 99% และสามารถใช้งานได้มากกว่า 1500 รอบ Shota Ito และคณะ [8] ได้ใช้ผ้ากราไฟต์ (Graphite felt) สำหรับขั้วแคโทด ซึ่งทำให้แบตเตอรี่สามารถคายประจุและอัดประจุได้อย่างรวดเร็วต่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด อีกทั้งยังให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุมากกว่า 90% อีกด้วย Yixin Li และคณะ [3] รายงานการใช้ผ้าคาร์บอนเป็นตัวดูดซับไอโอดีนสำหรับขั้วแคโทด ผลคือสามารถป้องกันการเกิดไตรโอะไอโอดีนไอออนได้ ทำให้มีสมรรถนะดีขึ้น โดยได้รายงานถึงค่าความสามารถในการเก็บประจุที่สูงถึง 99% และสามารถใช้งานได้มากกว่า 200 รอบ

2.3 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose (Na-CMC))

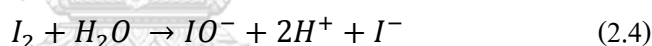
โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) ซึ่งเป็นสารยัดเกาะที่ละลายน้ำได้เป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ (Anionic polyelectrolyte) ด้วยการแตกตัวออกจากกันและรวมตัวกันเป็นกลุ่มฟังก์ชันของคาร์บอกซีเลทประจุลบ (Carboxylate anionic functional groups) เนื่องจากเป็นอนุพันธ์ย่อยของเซลลูโลส ซึ่งหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) บางกลุ่มถูกแทนที่ด้วยกลุ่มคาร์บอกซีเมทิล (-CH₂COOH) [21, 22] Zhongli Wang และคณะ ใช้ Na-CMC เป็นสารยัดสำหรับแคโทดของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอโอดีนเมื่อเทียบกับสารยัดประสานทั่วไป [22] ในทำนองเดียวกัน Fernanda Condi และคณะใช้ Na-CMC เพื่อเป็นตัวประสานสำหรับแคโทดของแบตเตอรี่ลิเทียม-ซัลเฟอร์ [21] ผลการวิจัยพบว่าสารยัดเกาะ Na-CMC สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่เหล่านี้ ยิ่งไปกว่านั้นมันยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนการประมวลผลต่ำ [21, 22]



รูปที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC)

2.4 โปแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide)

โปแทสเซียมไอโอไดด์ เป็นสารที่นิยมใช้เป็นตัวช่วยการละลายไอโอดีนในน้ำ เนื่องจากไอโอดีนไม่สามารถละลายในน้ำได้ โดยไอโอดีนจะทำปฏิกิริยากับน้ำแทน แต่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ น้ำจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลส้มอ่อน ปฏิกิริยาคือ



หรือ



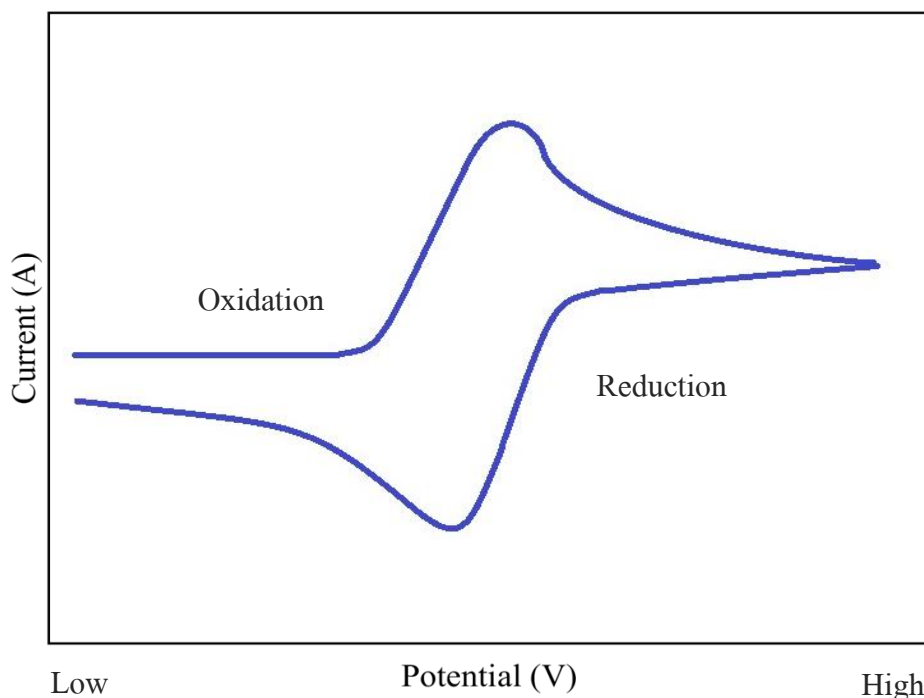
ดังนั้นแม้ว่าไอโอดีนจะละลาย แต่ไอโอดีนไม่ได้ “ละลาย” ในน้ำ แต่ไอโอดีนจะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อสร้างกรดไฮโปไอโอดีออส (HIO) และกรดไฮโดรจินิก (HI) สังเกตได้จากไอโอดีนเป็นสีม่วงและเมื่อละลายในตัวทำละลาย เช่น เฮกเซนสารละลายจะเป็นสีม่วง เมื่อไอโอดีนทำปฏิกิริยากับน้ำผลที่ได้คือสีน้ำตาลส้ม เห็นได้ชัดว่าไม่ใช่สีของธาตุไอโอดีน สิ่งนี้บ่งชี้ว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้นซึ่งไม่ใช่การละลาย ดังนั้นโปแทสเซียมไอโอไดด์ จึงเป็นส่วนสำคัญในการละลายไอโอดีนในน้ำเนื่องจากไอโอไดด์หรือ I^- ที่ได้จากการแตกตัวของโปแทสเซียมไอโอไดด์ จะไปทำปฏิกิริยากับไอโอดีนกลายเป็นไตรไอโอไดด์ไอออน ซึ่งละลายน้ำได้ [23]

2.5 เครื่องมือและเทคนิคการวิเคราะห์

เทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนนี้ เทคนิคการวิเคราะห์เหล่านี้ถูกใช้เพื่อการวัดและวิเคราะห์ลักษณะของเซลล์

ค่ากำลัง-พลังงาน (power-energy), พฤติกรรมรอบการอัดประจุ-คายประจุ (Cycling behavior), ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายโอนประจุ (Charge transfers characteristic) ขณะทำการทดลอง, การเปลี่ยนแปลงของวัสดุและอิเล็กโทรไลต์ สามารถตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคต่อไปนี้

2.5.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry)



รูปที่ 4 แสดงไซคลิกโวลแทมเมตรี

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction characteristic) ของอิเล็กโทรด ด้วยการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้า เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางด้านปริมาณและคุณภาพ เช่น จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง

กับการเกิดปฏิกิริยา ค่าความต่างศักย์ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชัน รวมทั้งปริมาณ และความเข้มข้นของสารประกอบตัวอย่าง

เครื่องมือโพเทนชิโอมิเตอร์ (potentiometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยการควบคุมความต่างศักย์ ทำการต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว คือขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) การวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมเมตรีจะแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (i) กับ ศักย์ไฟฟ้า (E) เรียกว่า “ไซคลิกโวลแทมโมแกรม” ดังแสดงในรูป 2.4 [24]

2.5.2 เทคนิคอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy)

เทคนิคอิมพีแดนซ์ เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์สารประกอบทางไฟฟ้าหรือเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยการประยุกต์ใช้สัญญาณเป็นแบบฟังก์ชันไซน์ที่แปรผันตามความถี่ (2-10mV) และ ศักย์ไฟฟ้าสถิตในการทดสอบเซลล์ ผลที่ได้จากเทคนิคนี้คือสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ซึ่งประกอบด้วยขนาดของอิมพีแดนซ์ (amplitude) และการเลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างสัญญาณ อินพุตและเอาต์พุตที่แต่ละความถี่

ในการประยุกต์ใช้แบตเตอรี่เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะการถ่ายโอนประจุเมื่อทำการอัด-คายประจุ (Cycling) สเปกตรัมอิมพีแดนซ์นั้นมีรูปแบบที่นำเสนอเพื่อวิเคราะห์ความต้านทานภายใน (Internal resistance), ความจุสองชั้น (Double-layer capacitance), ความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer resistance) และพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนประจุในแบตเตอรี่ แบบจำลองเกือบทั้งหมดของการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ เป็นแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานเช่นตัวต้านทาน (Resistor) ตัวเก็บประจุ (capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) [25-28]

2.5.3 เทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic)

วิธีการมาตรฐานสำหรับการพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์และการใช้งานแบบวนซ้ำ (Cyclability) คือการอัดประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ให้กับเซลล์ซ้ำ ๆ ภายใน แรงดันไฟฟ้าที่เฉพาะเจาะจงกระแสไฟฟ้าตัดด้านบน (Upper cut-off current) และค่ากระแสไฟฟ้า

ตัดด้านล่าง (Lower cut-off current) จะแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลา ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำมาใช้เพื่อกำหนดความสามารถในการเก็บประจุ (Specific capacity), ความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) และประสิทธิภาพในการเก็บประจุ (Coulombic efficiency) โดยทั่วไปกระแสที่ใช้ในทดสอบจะถูกทำให้กำหนดจากปริมาณของวัสดุที่ทำปฏิกิริยา (Active host material) บนอิเล็กโทรดดังแสดงในสมการ 2.6

$$\text{Current Density} = \frac{I}{m_{ac}} \quad (2.6)$$

ความสามารถในการเก็บประจุของแคโทดจะถูกกำหนดโดยการวัดค่าประจุทั้งหมดที่มาจากแคโทดเมื่อทำการอัดประจุหรือคายประจุ ค่าที่ได้มาจากการรวมกระแสในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเวลาจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะที่ถูกตัดออก (Cut-off) จากนั้นทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปโดยมวลของวัสดุที่ใช้งานดังแสดงในสมการ 2.7

$$\text{Specific Capacity} = \frac{1}{m_{ac}} \left(\int_{t_0}^{t_f} I d\tau \right) \quad (2.7)$$

พลังงานสำหรับการแตรประจุและคายประจุสามารถคำนวณได้โดย

$$\text{Energy Density} = \frac{1}{m_{ac}} \left(\int_{t_0}^{t_f} IV d\tau \right) \quad (2.8)$$

เปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการคายประจุเมื่อเทียบกับความสามารถในการชาร์จเรียกว่า ประสิทธิภาพในการเก็บประจุ (Coulombic efficiency) ประสิทธิภาพในการเก็บประจุเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาความสามารถในการอัดประจุซ้ำ (reversibility) ของแบตเตอรี่ ค่านี้สามารถคำนวณได้โดย

$$\text{Coulombic Efficiency} = \frac{\text{Discharge Capacity}}{\text{Charge Capacity}} \times 100\% \quad (2.9)$$

2.5.4 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ถูกส่องกราดบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยสามารถตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนและถูกกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron) ระบบจะตรวจจับ

สัญญาณและทำการประมวลผลแสดงบนจอภาพ เพื่อสังเกตสัญญาณวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาค [29]

2.5.5 เทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller (BET))

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของวัสดุตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ซึ่งจะทำการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยก่อนการทดลองจะต้องให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากวัสดุตัวอย่างและทำการผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่าง ซึ่งแก๊สไนโตรเจนจะถูกดูดซับบนวัสดุตัวอย่างทำให้ความดันในเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ จากข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้ เครื่องจะทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผล ออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน [30]

2.5.6 เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนในระดับโครงสร้างอะตอม ผลของรามานสเปกตรัมเกิดจากการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาภายในของโฟตอนรวมกับการสั่นของพันธะเคมี [31] เทคนิครามานสเปกโทรสโคปีเป็นเทคนิคที่วัดการกระเจิงของแสงและสามารถวัดตัวอย่างได้ภายในภาชนะที่บรรจุโดยไม่ต้องนำตัวอย่างออกจากภาชนะที่บรรจุเพื่อลดการปนเปื้อนของสารตัวอย่างที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนภาชนะ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวัดลักษณะ โครงสร้างของผลึก ลักษณะการแยกเฟส และการจับตัวใน โครงสร้างต่างๆ ได้ เทคนิครามานสเปกโทรสโคปีสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการวัดเป็น 2 แบบคือ

1. แบบการกระจาย (Dispersive Raman) ใช้หลักการโฟกัสแสงรามานที่เกิดเป็นเกรตติงข้อจำกัดในการใช้เทคนิคนี้คือ การเกิดฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าสัญญาณของรามานที่ตรวจวัดได้ทำให้ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นไปบดบังสัญญาณของรามาน เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สารที่มีสีหรือตัวอย่างที่มีสีเข้มเช่น ผงเขม่าดำ คาร์บอน เป็นต้น

2.แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (FT Raman) ใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นสูงไปกระตุ้นตัวอย่างเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ โดยจะมีอุปกรณ์สำคัญคือ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) ทำการแยกลำแสงรามานที่ตรวจวัดได้ออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านตัวแยกแสงไปยังกระจกที่เลื่อนได้ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนไปยังกระจกที่อยู่กับที่ โดยลำแสงทั้งสองนี้จะรวมกันอีกครั้ง โดยใช้ชุดแยกแสงชุดเดิม ทำการคำนวณเพื่อหาสัญญาณสเปกตรัมและนำไปวิเคราะห์ผล เหมาะสำหรับวัสดุตัวอย่างที่เกิดฟลูออเรสเซนซ์ หรือตัวอย่างที่มีสิ่งปนเปื้อนเพียงเล็กน้อยแล้วทำให้เกิดฟลูออเรสเซนซ์ มักใช้ในการทดสอบยาหรือสิ่งเสพติดต่างๆ เนื่องจากสารประกอบของวัสดุตัวอย่างส่วนใหญ่เกิดฟลูออเรสเซนซ์ได้ง่าย



บทที่ 3

ระเบียบงานวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์จิวแคโทด และทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของ โพลีเอทิลีนไอโอดีน (KI) และ ไอโอดีน (I_2) เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน ในแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์รวมไปถึงการวางแผนการดำเนินงานระหว่างการวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ในงานวิจัย

อุปกรณ์สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์

สารเคมี/วัสดุ	ยี่ห้อ/ผู้ผลิต	รายละเอียดจำเพาะ
Charcoal (Porous carbon)	PanReac plupliChem	Technical grade
Carboxymethyl cellulose sodium salt (CMC)	Sigma-Aldrich	Medium viscosity, MW 90,000
Zinc sulphate 7-hydrate ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)	Kemaus	AR grade, MW 287.58 g/mol
Iodine (I_2)	Kemaus	AR grade, MW 253.81 g/mol
Potassium iodide (KI)	Univar	AR grade, MW 166.00 g/mol
Conducting agent	Timcal	Supper P
Graphite felt	-	1 mm
Zinc sheet	-	0.05 mm
Glass microfiber	Whatman	GF/C, 1.2 μ m
Coin cell	-	CR2032

3.2 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

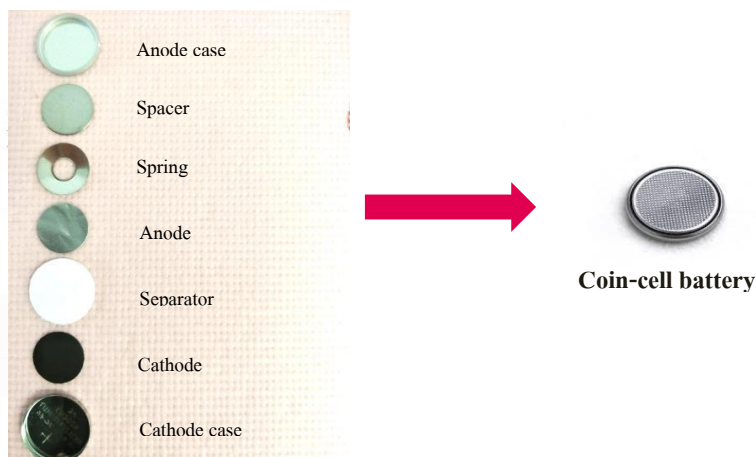
สารละลายที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในงานวิจัยนี้คือ ซิงค์ซัลเฟตเข้มข้น 2 โมลาริตี (2 M) ซึ่ง จะทำการเตรียมโดยทำการผสม เม็ดซิงค์ซัลเฟตและน้ำดีไอ (DI water) ที่ความเข้มข้น 2 M จากนั้น ทำการกวนผสมที่อุณหภูมิห้องจนสายละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในการนำมาใช้งานจะใช้สารละลาย อิเล็กโทรไลต์ ($ZnSO_4$ 2 M) ประมาณ 8-10 หยดต่อ 1 การทดลอง

3.3 การเตรียมขั้วแคโทด

ในการเตรียมขั้วแคโทด จะทำการผสม คาร์บอนกัมมันต์ ไอโอดีนผสม โพลีเอทิลีนออกไซด์ ตัวช่วยในการนำไฟฟ้า และตัวประสานในอัตราส่วน 40: 40: 10: 10 โดยน้ำหนัก ทำการกวน ผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โซนิค 30 นาที และทำการขึ้นรูปที่ความหนา 250 ไมโครเมตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการรีดเพื่อปรับความหนาให้เท่ากับที่ 100 ไมโครเมตร และนำมาตัดให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร ในการเตรียมขั้วแคโทดจะทำการเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างโพลีเอทิลีนออกไซด์กับไอโอดีนที่สัดส่วน 2:1, 1:1 และ 1:2 โดย น้ำหนัก และทำการขึ้นรูปตามขั้นตอนเดิม

3.4 การประกอบแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองจะใช้แบบแบตเตอรี่เหรียญ ก่อนทำการประกอบจะนำขั้ว แคโทดที่ได้จากการเตรียมก่อนหน้ามาแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประมาณ 10 นาที เพื่อให้ขั้ว แคโทดเปียกชุ่มไปด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำการประกอบโดยเริ่มจากชั้นล่างสุดคือ ฝา แคโทด ขั้วแคโทด แผ่นกั้น แผ่นสังกะสี สเปเซอร์ สปริง และปิดด้วยฝาขั้วแอโนด ทำการอัดให้ แน่นที่ความดันประมาณ 1500 psi นำตัวอย่างที่ได้ไปทำการทดสอบต่างๆต่อไป



รูปที่ 5 องค์ประกอบของแบตเตอรี่แบบเหรียญ

3.5 การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical Test)

3.5.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry)

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ โดยจะทำการทดสอบในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ 0.7 ถึง 1.7 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ด้วยอัตราการสแกน (scan rate) เท่ากับ 5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ด้วยเครื่องมือ Versa STAT 3 ซอฟต์แวร์ Versa Studio ทำการต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว คือขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode)

3.5.2 เทคนิคอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy)

เทคนิคอิมพีแดนซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานในแบตเตอรี่ที่ความถี่ต่างๆ เพื่อยืนยันศึกษากลไกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยจะทำการทดสอบที่ความถี่ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ถึง 10 มิลลิเฮิร์ตซ์ (mHz) แอมพลิจูด 10 มิลลิโวลต์ (mV RMS) ด้วยเครื่องมือ Versa STAT 3 ซอฟต์แวร์ Versa Studio

3.5.3 เทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic)

เทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ในเชิงสมรรถนะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ เช่น การหาค่าการเก็บประจุในแต่ละรอบการใช้งาน (Cycling Capability) ความเสถียร (Stability) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการเก็บประจุ (Rate Capability) และอื่นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบตเตอรี่แบบหลายช่องสัญญาณ (multi-channel battery tester) ทำการทดสอบในช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.7-1.7 โวลต์ ที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C, 6C และทำการคงกระแสไว้ที่ 4C ประมาณ 1000 รอบ

3.6 การทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization Test)

3.6.1 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสัณฐานวิทยาของวัสดุ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบขั้วแคโทดแบตเตอรี่ก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ 100 รอบ ที่กระแส 3C เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงขั้วแคโทดแบตเตอรี่ในแต่ละสภาวะ

3.6.2 เทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET)

เทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบพื้นที่ผิวและความพรุนของวัสดุตัวอย่างผ่านเครื่องวิเคราะห์ห้ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer) โดยในงานวิจัยนี้วัสดุตัวอย่างถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำและพื้นที่ผิวที่ดูดซับไอโอดีน (Surface Adsorbed Iodine) ออกจากวัสดุตัวอย่าง จากนั้นทำการไล่โมเลกุลอื่นๆ (degassed) ออกจากวัสดุ ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง [32] วัสดุตัวอย่างที่ทดสอบจะใช้วัสดุที่ทำการดูดซับไอโอดีนและไม่ดูดซับไอโอดีนเพื่อสังเกตความแตกต่างของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน

3.6.3 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของคาร์บอนบนขั้วแคโทดผ่านเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer) เพื่อตรวจสอบพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับไอโอดีน โดยทำการเปรียบเทียบกราฟระหว่างขั้วแคโทดที่ทำการดูดซับไอโอดีนและขั้วแคโทดที่ไม่มีการดูดซับไอโอดีน

บทที่ 4

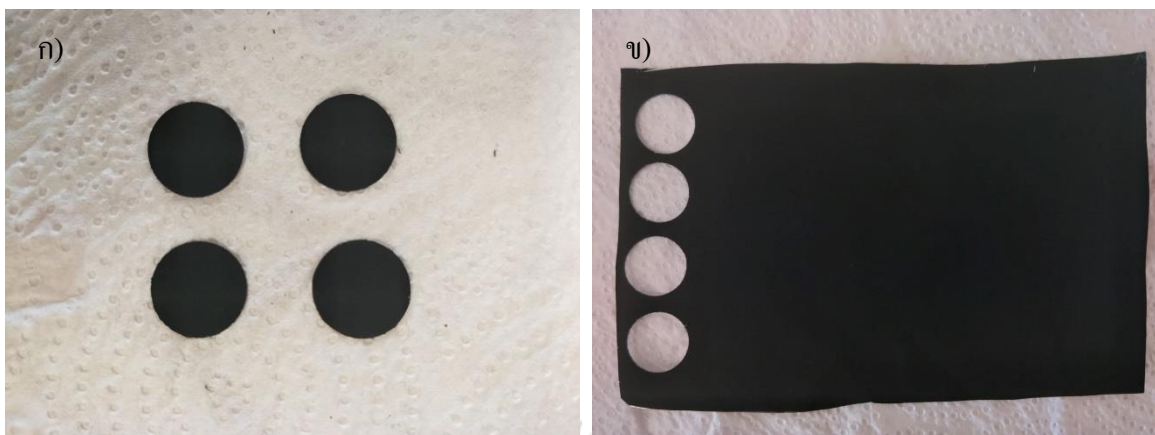
ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีน (Zinc Iodine Batteries) ในรูปแบบแบตเตอรี่เหรียญ (Coin Cell Type) เพื่อง่ายต่อการตรวจสอบและไม่สิ้นเปลืองวัสดุ โดยในส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ (Characterization Test) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยการนำขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ไปทำการตรวจสอบสัณฐานของอนุภาค โครงสร้างผลึก การกระจายตัว รวมถึงตรวจสอบพื้นที่ผิววรูปนของคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับไอโอดีน สำหรับส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Electrochemical Test) โดยจะนำขั้วที่มีปริมาณโพแทสเซียมไอโอไดด์แตกต่างกันมาใช้เป็นขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ ซึ่งได้ทำการทดสอบทดสอบพฤติกรรมกการโพลาริเซชันของความจุเทียบกับความหนาแน่นกระแส (Rate Capability) ของแบตเตอรี่สมรรถนะของแบตเตอรี่ (Cycling Performance) ปฏิกริยารีดักชันและออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ (Cyclic Voltammetry) และได้ทำการวิเคราะห์กลไกที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ผ่านเทคนิคอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy) อีกด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการขึ้นรูปขั้วแคโทดของแบตเตอรี่

งานวิจัยนี้ได้นำคาร์บอนกัมมันต์มาใช้เป็นตัวดูดซับไอโอดีน (I_2) บนขั้วแคโทด เพื่อป้องกันการเกิดไตรไอโอไดด์ไอออน (I_3^-) [33] และใช้โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) มาใช้เป็นตัวยึดเกาะ (Binder) สารต่างๆบนแผ่นแกรไฟต์ ข้อดีของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) คือ เป็นเยื่อแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Membrane) ซึ่งทำให้สามารถป้องกันการเกิดไตรไอโอไดด์ไอออน (I_3^-) [22] หลุดออกมาและไปทำลายแผ่นสังกะสีที่ขั้วแอโนด

การสังเคราะห์ขั้วแคโทดทำได้โดยผสมคาร์บอนกัมมันต์ ไอโอดีนผสมโพแทสเซียมไอโอไดด์ ตัวช่วยในการนำไฟฟ้า (Conductive agent) และตัวประสาน (Binder) ในอัตราส่วน 40: 40: 10: 10 โดยน้ำหนัก และทำการขึ้นรูปบนแผ่นแกรไฟต์โดยมีความหนาเท่ากับ 100 ไมโครเมตร และตัดให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร โดยผลของการสังเคราะห์ขั้วแคโทดจะแสดงดังรูปที่ 6



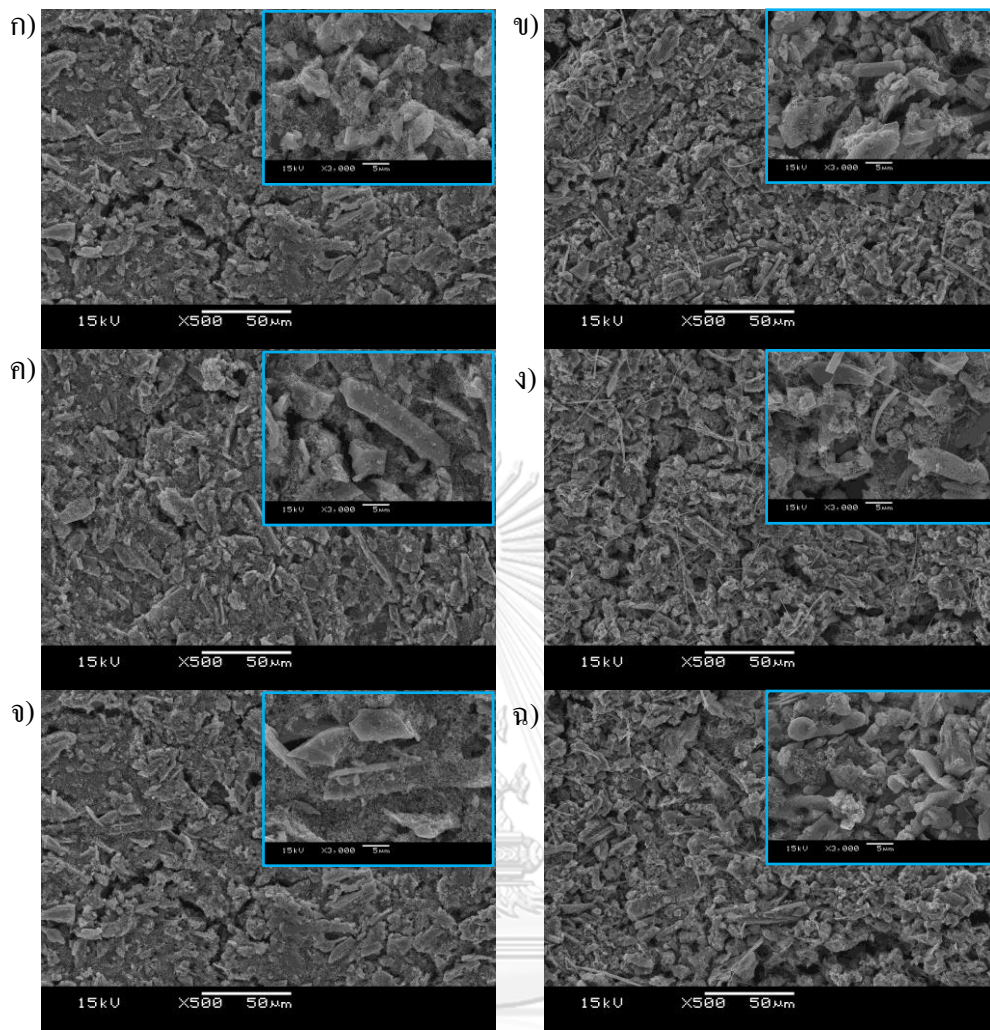
รูปที่ 6 ขั้วแคโทดที่ทำการสังเคราะห์ ก) ขั้วที่นำไปใช้ประกอบแบตเตอรี่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ข) ขั้วแบตเตอรี่หลังทำการขึ้นรูป

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization Test)

4.2.1 ผลการศึกษาพื้นฐานของอนุภาค โครงสร้างผลึกและการกระจายตัวของอนุภาคบนขั้วแคโทด

ในส่วนของการศึกษาพื้นฐานของอนุภาค โครงสร้างผลึกและการกระจายตัวของสารบนขั้วแคโทด จะใช้เทคนิคทางจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscopy Techniques) ซึ่งจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ในการตรวจสอบ [34]

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานของอนุภาคและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ปรากฏว่าลักษณะพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างก่อนทำการอัด-คายประจุ (รูปที่ 7 ก, ค, จ) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในทุกสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) ทั้งในด้านของพื้นฐานของอนุภาค โครงสร้างผลึกและการกระจายตัวของสาร และจากรูปที่ 7 ข, ง, ฉ) แสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างหลังทำการอัด-คายประจุ 100 รอบ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวที่แสดง (รูปที่ 7 ข, ง, ฉ) มีความใกล้เคียงกับลักษณะพื้นผิวก่อนทำการอัด-คายประจุ กล่าวคือ ขั้วแคโทดที่ใช้ในการทำแบตเตอรี่มีความคงทนต่อการใช้งาน



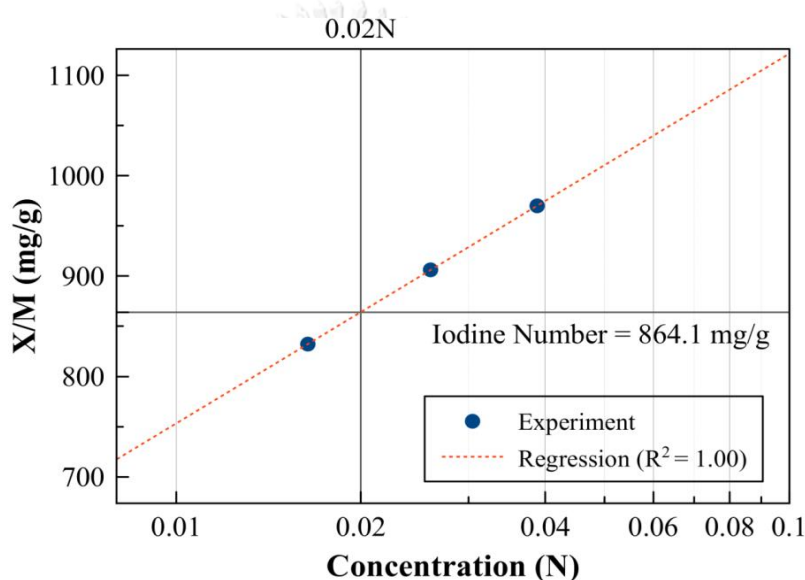
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานของอนุภาคและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) ก) 1:1 ค) 1:2 จ) 2:1 ก่อนทำการอัด-คายประจุ และ ข) 1:1 ง) 1:2 ฉ) 2:1 หลังทำการอัด-คายประจุ 100 รอบ

4.2.2 ผลการทดลองหาค่าไอโอดีน (Iodine Number) ของคาร์บอนกัมมันต์

ในการทดลองหาค่าไอโอดีน (Iodine Number) ของคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัย จะทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94(2006) โดยจะนำคาร์บอนกัมมันต์มาดูดซับสารละลายไอโอดีน (Standard Iodine Solution) ที่มีความเข้มข้น 0.1 N และทำการกรอง จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำการไทเทรต (Titration) โดยใช้ น้ำแป้ง เป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) เพื่อหาความเข้มข้น

ของไอโอดีนที่เหลือจากการดูดซับลงบนคาร์บอนตัวอย่าง ในการทดลองจะทำการทดลอง 3 ครั้งที่น่าหนักคาร์บอนกัมมันต์แตกต่างกัน ซึ่งจะได้ค่าดูดซึมไอโอดีนต่อกรัมคาร์บอนเท่ากับ 970, 906 และ 832 mg/g carbon และเมื่อนำค่าที่ได้มาวาดกราฟ (รูปที่ 8) จะได้ค่าไอโอดีน (Iodine Number) มีเท่ากับ 864.1 mg/g carbon จากค่าไอโอดีนที่ได้ (Iodine Number) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของไอโอดีนที่ใช้มากที่สุด (โพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) 1:2 หรือ 750 mg/g carbon) ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าไอโอดีน (Iodine Number) ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสามารถดูดซับไอโอดีนได้ทั้งหมด [35]



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมไอโอดีน (Iodine Absorb) กับ ความเข้มข้นของไอโอดีน

4.2.3 ผลการทดสอบหาพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET)

การทดสอบพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) เป็นการทดสอบเพื่อหาพื้นที่ผิวรูพรุนระหว่างก่อนทำการดูดซับและหลังทำการดูดซับไอโอดีน [32, 36-38] โดยผลที่ได้แสดงตามตารางที่ 3 การทดสอบของตัวอย่างก่อนทำการดูดซับไอโอดีน (No iodine) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (S_{BET}) เท่ากับ $111.4934 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรไมโครพอร์ (V_{mic}) เท่ากับ, $0.0222 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน (D) มีค่าเท่ากับ 51.652 \AA ในขณะที่หลังทำการดูดซับไอโอดีนแล้ว (With iodine) จะเหลือพื้นที่ผิวจำเพาะ (S_{BET}) ปริมาตรไมโครพอร์ (V_{mic}) และขนาดของรูพรุน (D) เพียง 34.8149

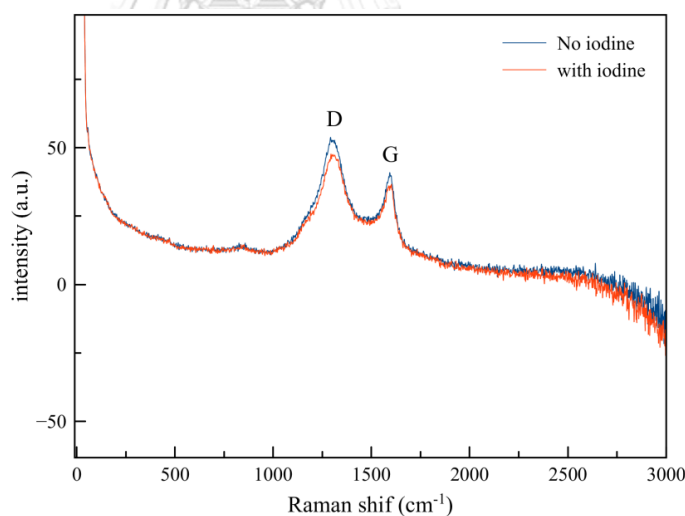
m^2/g 0.0127 cm^3/g และ 20.144 $Å^{\circ}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ไอโอดีนถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ โดยดูได้จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรไมโครพอร์ และขนาดรูพรุนที่ลดลงหลังทำการดูดซับไอโอดีน

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Brunauer-Emmett-Teller (BET)

ชนิดตัวอย่าง	S_{BET} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	D ($Å^{\circ}$)
No iodine	111.4934	0.0222	51.652
Adsorb iodine	34.8149	0.0127	20.144

4.2.4 ผลการทดสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) ถูกใช้สำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวแคโทด [8, 39-42] จากรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลรามานสเปกตรัม (Raman Spectrum) ของข้าวแคโทด

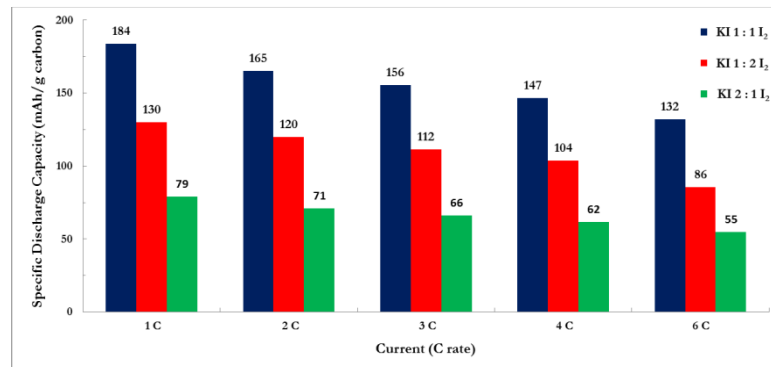
จะสังเกตเห็นพีกของ D-band ($\sim 1300\text{ cm}^{-1}$) และ G-band (~ 1600) อย่างชัดเจน โดย D-band แสดงถึงโครงสร้างที่มีข้อบกพร่อง (Defect) ของกราฟไฟต์และโครงสร้างที่ขอบของกราฟไฟต์ไม่เป็นระเบียบ (Disorder) [43, 44] โดย D-band เกิดจากโหมดการสั่น (Breathing mode) ของพันธะอะตอมคาร์บอนแบบ sp^2 ในวงแหวนอะโรมาติก [45] ในขณะที่ G-band แสดงถึงคุณลักษณะของกราฟไฟต์ซึ่งความถี่ที่แสดงเป็น G-band ได้รับความถี่จากการสั่นในโหมด E_{2g} (E_{2g} mode) ซึ่งเป็นการสั่น

ของพันธะที่อยู่ในระนาบ โดยการสันดั่งกลางเป็นไฮบริไดเซชันแบบ sp^2 (sp^2 hybridization) ของอะตอมคาร์บอน [44, 46] แต่ไม่สามารถเห็นพิกของพันธะระหว่างคาร์บอนกับไอโอดีนได้ (C-I) ทั้งของตัวอย่างก่อนทำการดูดซับไอโอดีนและหลังทำการดูดซับไอโอดีน แสดงให้เห็นว่าไอโอดีนเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์โดยไม่เกิดพันธะระหว่างกัน และเมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าความเป็นแกรไฟต์ซึ่งถูกรายงานเป็นอัตราส่วนของ I_D/I_G โดยค่าที่ได้มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.31 และ 1.29 ของตัวอย่างก่อนทำการดูดซับไอโอดีนและหลังทำการดูดซับไอโอดีน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับไอโอดีนไม่ทำให้โครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์เปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่ความเข้มข้นของ D-band สูงขึ้นจะแสดงถึงพันธะไพ (π bond) ของไฮบริไดเซชันแบบ sp^2 ของอะตอมคาร์บอนถูกแทนที่ด้วยพันธะซิกมา (σ bond) ซึ่งเป็นไฮบริไดเซชันแบบ sp^3 ของคาร์บอน-คาร์บอน โดยจะนำไปสู่การเกิดโครงสร้างที่บกพร่อง (Structural defect) ไปจากกราฟไฟต์/กราฟีนที่สมบูรณ์แบบ [43, 47]

4.3 ผลทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical Test)

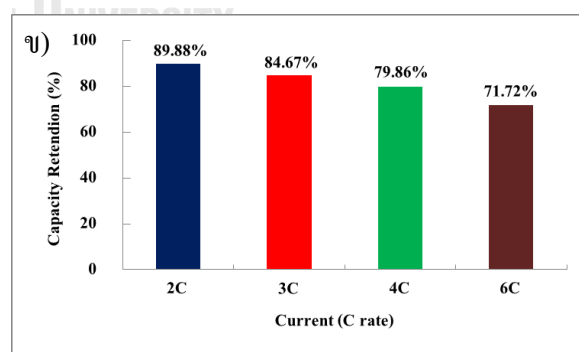
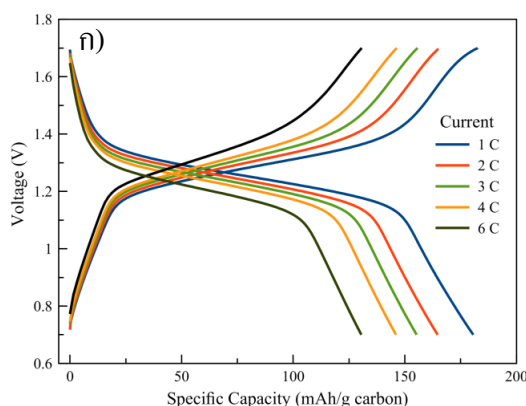
4.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic)

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าคายความจุ (Specific Discharge Capacity) เพื่อหาสัดส่วนที่มีค่ามากที่สุดสำหรับการใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนแบบอัดประจุซ้ำได้ (Rechargeable Zinc-iodine batteries) จากผลการทดสอบเทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic) พบว่า ที่สัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1 ($KI:I_2 = 1:1$) ให้ค่าคายประจุเท่ากับ 184, 165, 156, 147 และ 132 mAh/g carbon ที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:2 ($KI:I_2 = 1:2$) ที่ให้ค่าคายประจุเท่ากับ 130, 120, 112, 104 และ 86 mAh/g carbon และ สัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 2:1 ($KI:I_2 = 2:1$) ที่ให้ค่าคายประจุเท่ากับ 79, 71, 66, 62 และ 55 mAh/g carbon ที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C ตามลำดับ กล่าวคือที่สัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1 ให้ค่าคายประจุมากที่สุดในทุกกระแส ผลลัพธ์ที่ได้บ่งบอกถึงปริมาณไอโอดีนที่มีมากที่สุดในรูพรุนของคาร์บอน เนื่องจากไตรไอโอไดด์ไอออน (I_3^-) เป็นตัวถูกดูดซับลงบนคาร์บอนกัมมันต์ ดังนั้นที่สัดส่วน 1:1 ที่มีปริมาณไตรไอโอไดด์ไอออนมากที่สุดจึงให้ค่าคายประจุมากที่สุด



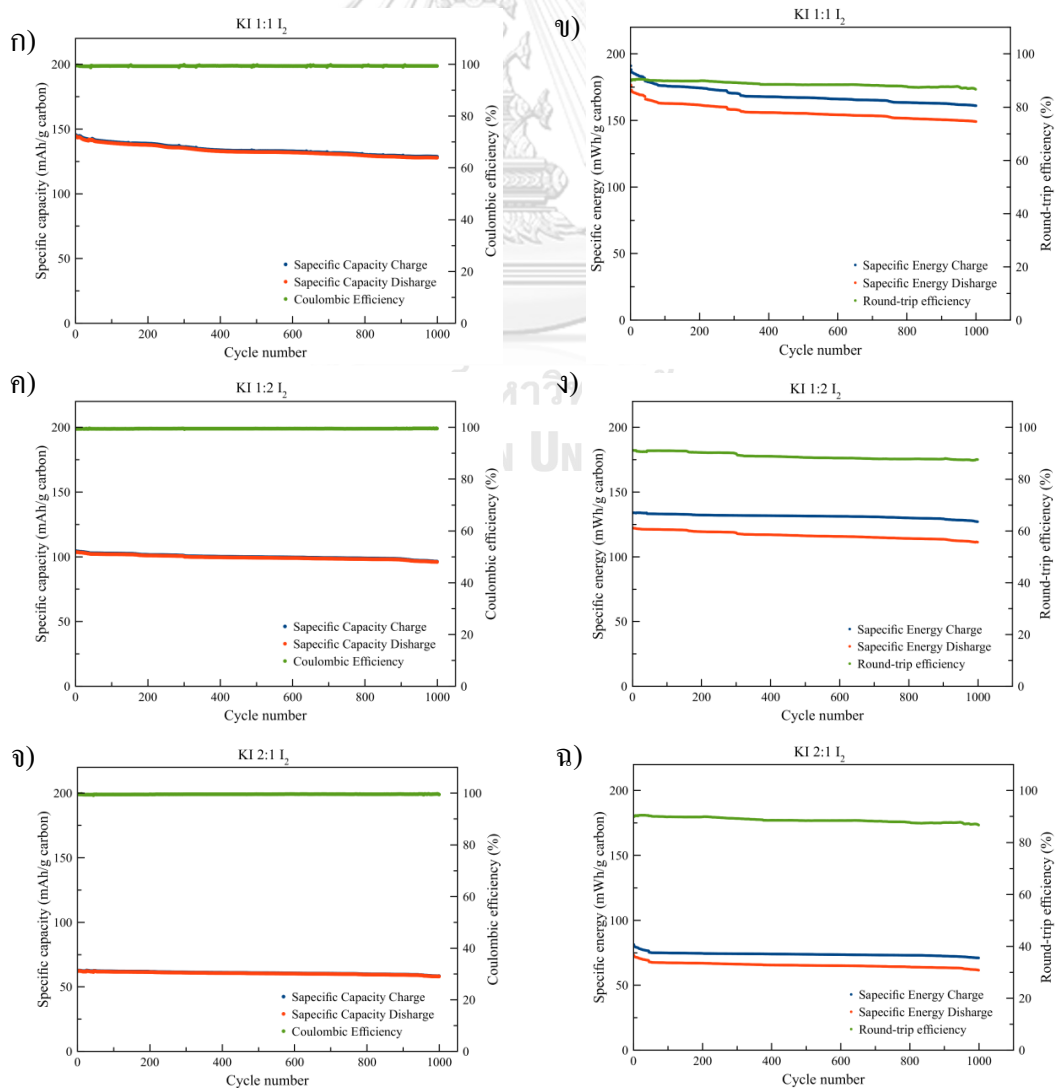
รูปที่ 10 ค่าคายความจุ (Specific Discharge Capacity) ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) 1:1, 1:2 และ 2:1 ที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C

เมื่อทำการทดสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการเก็บประจุ (Rate Capability) จากรูปที่ 11 ก) โดยเปรียบเทียบค่าความจุจำเพาะ (Specific Capacity) ของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีน ที่สัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1 ณ กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C ในช่วง 0.7-1.7 โวลต์ พบว่า เมื่อทำการเพิ่มกระแสค่าคายประจุจะมีค่าลดลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 184, 165, 156, 147 และ 132 mAh/g carbon ที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C ตามลำดับ กล่าวคือแบตเตอรี่มีค่าคายประจุคงเหลือ (Capacity Retention) เมื่อเทียบกับกระแส 1C เท่ากับ 89.67%, 84.78%, 79.89% และ 71.74% ดังแสดงในรูปที่ 11 ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แบตเตอรี่ที่กระแสสูงถึง 6C ได้ [33, 48, 49]

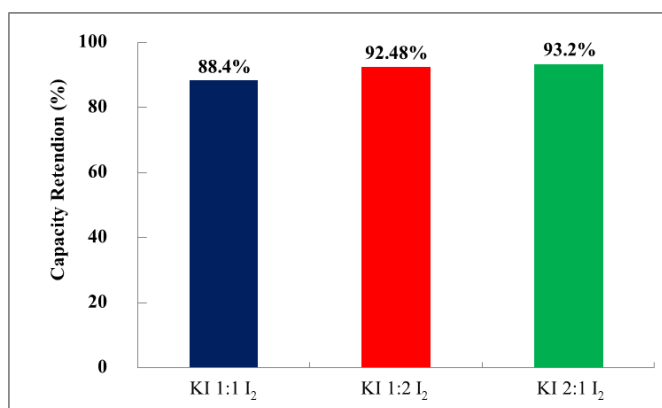


รูปที่ 11 ก) ผลค่าคายความจุ (Specific Discharge Capacity) ขณะทำการทดสอบที่กระแส 1C, 2C, 3C, 4C และ 6C ข) ค่าคายประจุคงเหลือ (Capacity Retention) เมื่อเทียบกับกระแส 1C ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) 1:1

จากรูปที่ 12 แสดงค่าการเก็บประจุในแต่ละรอบการใช้งาน (Cycling Capability) ที่กระแส 4C ในช่วง 0.7-1.7 โวลต์ พบว่า ประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ (Coulombic Efficiency) และพลังงาน (Round-Trip Efficiency) ในแต่ละรอบการใช้งานมีค่าใกล้เคียงกันทุกตัวอย่างการทดลอง โดยมีค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1 ตลอดการทดลอง 1000 รอบประมาณ 99.37, 99.56%, 99.51 ตามลำดับ (รูปที่ 12 ก, ค, จ) และมีค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน ณ การใช้งาน 1000 รอบประมาณ 86.79%, 87.29, 86.7% ตามลำดับ (รูปที่ 12 ข, ง, ฉ) โดยจากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุและพลังงานของทุกตัวอย่างการทดลองเกือบจะคงที่ และเมื่อสังเกตค่าความจุของแบตเตอรี่ในแต่ละสัดส่วนของการทดลองตลอดการใช้งาน 1000 รอบ จะเห็นได้ว่าค่าความจุและความเร็วในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด



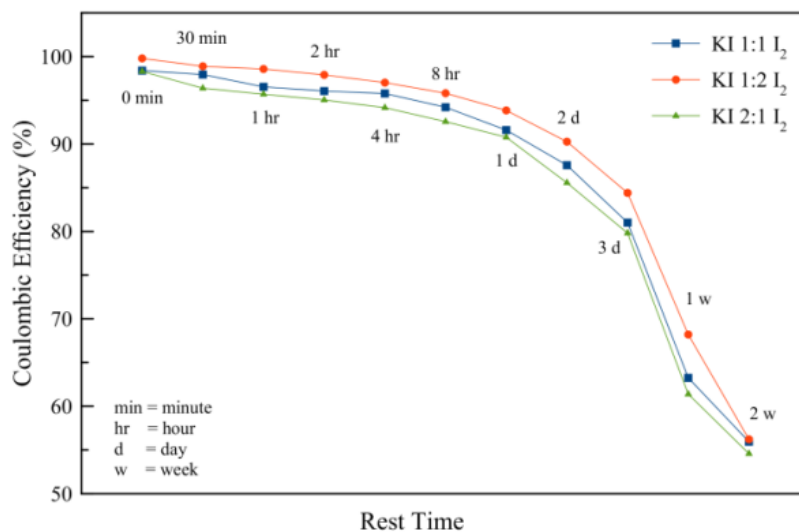
รูปที่ 12 ก) แสดงประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ (Columbic Efficiency) ในแต่ละรอบการทดสอบของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) 1:1 ข) KI:I₂=1:2 ค) KI:I₂= 2:1 ง) แสดงประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน (Round-Trip Efficiency) ในแต่ละรอบการทดสอบของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) 1:1 ข) 1:2 ค) 2:1 ที่กระแส 4C



รูปที่ 13 แสดงค่าคายประจุที่เหลือ (Capacity Retention) เมื่อเทียบกับการใช้งานรอบที่สอง ณ การใช้งานรอบที่ 1000 ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1 ที่กระแส 4C

จากรูปที่ 13 แสดงค่าคายประจุที่เหลือเมื่อเทียบกับการใช้งานรอบที่สอง ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1 ณ การใช้งานรอบที่ 1000 เท่ากับ 88.4%, 92.4% และ 93.2% ดังแสดงในรูป ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ พลังงาน และ ค่าคายประจุที่เหลือ แสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพในการใช้งานของแบตเตอรี่ที่กระแส 4C ณ การใช้งานกว่า 1000 รอบ [49]

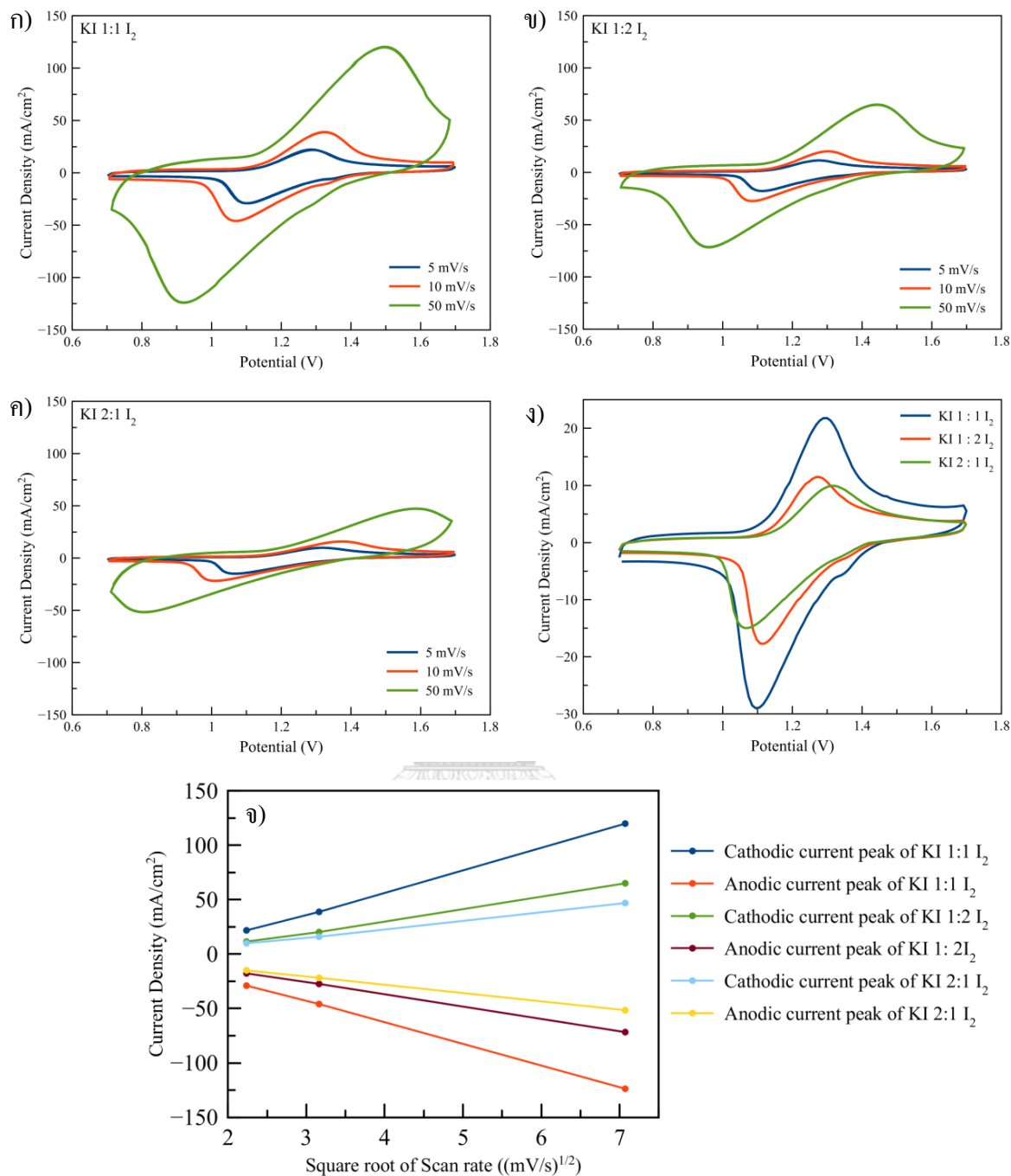
จากรูปที่ 14 แสดงค่าการคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยตัวเอง (Self Discharge) โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า แบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีนมีค่าการคายประจุด้วยตัวเองสูงมาก ซึ่งสังเกตได้จากเมื่อทำการพักแบตเตอรี่ (Rest Time) เป็นเวลา 1 วัน แบตเตอรี่มีค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บประจุเหลือเพียงประมาณ 90% และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อทำการพักแบตเตอรี่เป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยจะเหลือค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บประจุเพียงประมาณ 55% ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันในทุกสัดส่วนของตัวอย่างการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจาย (Diffusion) ของไอโอดีนผ่านแผ่นกั้น (Separator) อย่างรวดเร็ว ทำให้แบตเตอรี่เกิดการคายประจุเองอย่างรวดเร็ว [50, 51] แสดงให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมสำหรับเก็บแบตเตอรี่ไว้ใช้งานหลังการประดิษฐ์ อีกทั้งยังไม่เหมาะสมในการใช้งานแบตเตอรี่แบบไม่ต่อเนื่องอีกด้วย



รูปที่ 14 แสดงค่าการคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยตัวเอง (Self Discharge) ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1

4.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry)

การทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีเพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายโอนไอออนในวัสดุคาร์บอนมีรูพรุนซึ่งใช้เป็นขั้วแคโทดในอิเล็กโทรไลต์ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) โดยกำหนดอัตราสแกน (Scan rate) เท่ากับ 5, 10 และ 50 mV/s ของทุกสัดส่วนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 15 ก), ข) และ ค) โดยจะสังเกตเห็นถึงพิกที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเพียงพิกเดียว ทั้งฝั่งของแคโทดิกพิก (Cathodic peak) และแอโนดิกพิก (Anodic peak) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาของระบบที่เกิดขึ้นเพียงปฏิกิริยาเดียว กล่าวคือไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงบนขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ และช่วงโวลต์ที่นำมาใช้ในการทดลอง (0.7-1.7 V) ครอบคลุมปฏิกิริยาที่เราสนใจทั้งหมด และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการทดลองด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีระหว่างแต่ละสัดส่วนที่อัตราสแกนเท่ากับ 5 mV/s ดังแสดงในรูปที่ 15 ง) จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1 มีค่ามากที่สุด และสัดส่วน 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ ทั้งฝั่งของแคโทดิกพิก (Cathodic peak) และแอโนดิกพิก แสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา [52, 53] ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1 มีค่ามากที่สุด ซึ่งเป็นผลไปในทางเดียวกันกับการตรวจสอบด้วยเทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า

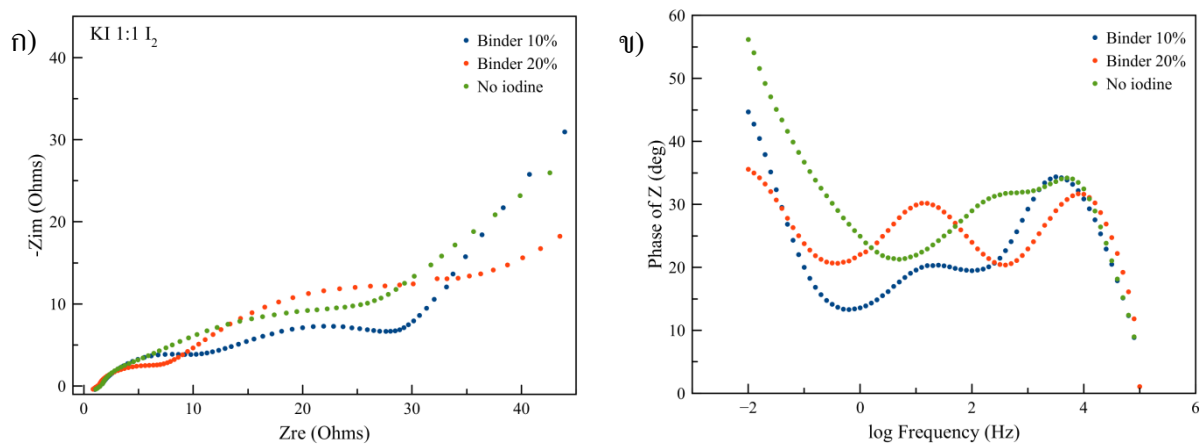


รูปที่ 15 กราฟโวลแทมเมตรีในช่วง 0.7-1.7 โวลต์ อัตราสแกน (Scan rate) 5, 10 และ 50 mV/s ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน ก) 1:1 ข) 1:2 ค) 2:1 ง) แสดงผลการเปรียบเทียบโวลแทมเมตรีของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีนแต่ละสัดส่วนที่อัตราสแกน 5 mV/s จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสสูงสุด กับ รากที่สองของอัตราสแกน

และเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสังกะสี (Diffusion Coefficient) ตามสมการของ Randles-Sevcik [54, 55] จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสสูงสุดของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (i_{pa}) กับอัตราการสแกน ($v^{1/2}$) และความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสสูงสุดของปฏิกิริยารีดักชัน (i_{pc}) กับอัตราการสแกน ($v^{1/2}$) ดังแสดงในรูปที่ 15 จ) โดยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน เท่ากับ 2.32×10^{-2} , 1.32×10^{-2} และ 8.92×10^{-3} cm^2/s ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ และได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของปฏิกิริยารีดักชัน เท่ากับ 2.40×10^{-2} , 1.32×10^{-2} และ 9.08×10^{-3} cm^2/s ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1 มีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นถึงความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1 ที่มากที่สุด

4.3.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy)

จากรูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนโดยใช้หลักการรบกวนความต่างศักย์กระแสสลับแบบฟังก์ชันไซน์ เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้าระหว่างไอโอดีนในรูปพูนของคาร์บอนกับสังกะสี โดยป้อนแรงดันขณะแบตเตอรี่อยู่ในสถานะหลังการอัดประจุในช่วง ความถี่ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ถึง 10 มิลลิเฮิร์ตซ์ (mHz) แอมพลิจูด 10 มิลลิโวลต์ (mV RMS) เพื่อศึกษากลไกที่เกิดขึ้นภายในระบบ ซึ่งจากรูปจะทำการเปรียบเทียบขั้วแคโทดที่ทำการดูดซึมไอโอดีนและผสมสารยึดเกาะ 10% และ 20% กับขั้วแคโทดที่ไม่ได้ทำการดูดซึมไอโอดีน โดยจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟรูปที่ 16 ข) จะมีพีคเกิดขึ้น 2 พีคอย่างชัดเจน คือ พีคในช่วงความถี่สูง (log frequency ประมาณ 4) และพีคในช่วงความถี่กลาง (log frequency ประมาณ 1) และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแต่ละตัวอย่างจะเห็นได้ว่า พีคในช่วงความถี่สูง จะสามารถสังเกตเห็นได้ในทุกตัวอย่าง และช่วงความถี่กลางจะสามารถสังเกตเห็นได้เฉพาะตัวอย่างของขั้วแคโทดที่ทำการดูดซึมไอโอดีนเท่านั้นเท่านั้น กล่าวคือ พีคในช่วงความถี่สูงแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของสังกะสี และพีคในช่วงความถี่กลางแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของไอโอดีน



รูปที่ 16 กราฟอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนที่ความถี่เริ่มต้น 200 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ถึง 10 มิลลิเฮิร์ตซ์ (mHz) ของแบตเตอรี่สังกะสีไอโอดีน ก) ไนควิสต์ (Nyquist) ข) โบดี (Bode)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีน โดยใช้สัดส่วนที่แตกต่างกันของ โพลีเอทิลีนออกไซด์ (PI) และ ไอโอดีน (I_2) ซึ่งมีคาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับไอโอดีน ด้วยการเทคนิควิเคราะห์ต่างๆทั้งในด้านของลักษณะเฉพาะ (Characterization Test) และคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical Test) เช่น เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) เทคนิคอัด-คายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic) เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry) โดยผลของการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization Test)

1) การละลายโพลีเอทิลีนออกไซด์ (PI) และ ไอโอดีน (I_2) ในน้ำจะทำให้เกิดไตรไอโอดีน (I_3^-) ซึ่งมีสีเหลือง และเมื่อนำคาร์บอนกัมมันต์มาผสมรวมด้วยจะทำให้สารละลายสีเหลืองกลายเป็นใส สรุปได้ว่า ไตรไอโอดีนไอออน เป็นตัวถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีการทางกายภาพ และไม่เกิดพันธะระหว่างคาร์บอนกับไอโอดีน ซึ่งยืนยันจากผลทดสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

2) ค่าไอโอดีน (Iodine Number) ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 864.1 mg/g carbon ซึ่งมีค่ามากกว่าปริมาณโพลีเอทิลีนออกไซด์ต่อไอโอดีน (KI:I₂) ที่เยอะที่สุดคือ 1:2 หรือ 750 mg/g carbon สรุปได้ว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่ทำมาใช้ทำขั้วแคโทดสามารถดูดซับไอโอดีนได้ทั้งหมด

3) โครงสร้างและการกระจายตัวของขั้วแคโทดในแต่ละสัดส่วนโพลีเอทิลีนออกไซด์ต่อไอโอดีน (1:2, 1:2 และ 2:1) มีลักษณะใกล้เคียงกัน ทั้งก่อนการทำการอัด-คายประจุและหลังการอัด-คายประจุ 100 รอบ สรุปได้ว่าขั้วแคโทดที่นำมาใช้ในการทดลองมีความคงทนต่อการนำมาใช้งานในแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีน

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrochemical Test)

1) แบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีนที่สัดส่วนโพลีเอทิลีนออกไซด์ต่อไอโอดีนเท่ากับ 1:1 มีค่าคายความจุ (Specific Discharge Capacity) มากที่สุดในทุกกระแส ซึ่งเป็นผลมาจากมีปริมาณไตรไอ

โอไซด์มากที่สุด และสามารถใช้งานได้ในกระแสที่สูงถึง 6C โดยมีค่าคายประจุคงเหลือ (Capacity Retention) เมื่อเทียบกับกระแส 1C เท่ากับ 71.74%

2) แบตเตอรี่มีความทนต่อการใช้งาน เนื่องจากประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ (Columbic Efficiency) และพลังงาน (Round-Trip Efficiency) ในแต่ละรอบการใช้งานมีค่าใกล้เคียงกันทุกตัวอย่างการทดลอง โดยมีค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุตลอดการทดลอง 1000 รอบประมาณ 99.5% และมีค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน ณ การใช้งาน 1000 รอบประมาณ 87% และมีค่าคายประจุคงเหลือ ณ การใช้งาน 1000 รอบเมื่อเทียบกับการใช้งานรอบที่สองสูงถึง 88.4%, 92.4% และ 93.2% ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไซด์ต่อไอโอดีน 1:1, 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ

3) แบตเตอรี่มีค่าการคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยตัวเอง (Self Discharge) ที่สูงเป็นอย่างมาก โดยสังเกตได้จากเมื่อทำการพักแบตเตอรี่เป็นเวลา 2 สัปดาห์ จะเหลือค่าประสิทธิภาพในการกักเก็บประจุเพียงประมาณ 55%

4) ช่วงโวลต์ในการทดลอง (0.7-1.7 V) คลอบคลุมปฏิกิริยาที่สนใจทั้งหมดและไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงบนขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ และความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไซด์ต่อไอโอดีน 1:1 ที่มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ตามสมการของ Randles-Sevcik ที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันเท่ากับ $2.40 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของปฏิกิริยรีดักชันเท่ากับ $2.32 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของโพแทสเซียมไอโอไซด์ต่อไอโอดีน (KI:I_2) ที่นำมาใช้ในการทำแบตเตอรี่คือสัดส่วน 1:1 เพราะมีค่าคายประจุมากที่สุด มีประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ (Columbic Efficiency) และพลังงาน (Round-Trip Efficiency) ที่สูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานถึง 1000 รอบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการจัดเก็บขั้วแคโทดมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถโดนแสงแดดได้ และไม่ควรถูกเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากไอโอดีนที่อยู่ภายในขั้วแคโทดสามารถหลุดออกมาได้ ดังนั้นการแก้ไขอย่างหนึ่งคือ การเก็บในภาชนะทึบแสง และไม่ใช้ขั้วแคโทดที่เก็บรักษามาอย่างยาวนานมาทำการวิเคราะห์ผล

2) เนื่องจากระยะเวลาเก็บรักษาขั้วแคโทดส่งผลต่อปริมาณไอโอดีนที่หายไปของขั้วแคโทด จึงควรทำการเปรียบเทียบตัวอย่างที่แตกต่างกันในระยะเวลาการเก็บรักษาที่ใกล้เคียงกัน

3) ปัญหาการนำขั้วแคโทดหลังทำการอัด-คายประจุออกมาจากแบตเตอรี่ โดยจะเกิดการติดกันของขั้วแคโทดและแผ่นกั้น ทำให้มีขั้วแคโทดบางส่วนติดไปกับแผ่นกั้นขณะทำการแยกขั้วแคโทดออกจากแบตเตอรี่ อีกทั้งยังมีเส้นใยของแผ่นกั้นติดมากับขั้วแคโทดอีกด้วย อาจแก้ไขโดยการเปลี่ยนชนิดของแผ่นกั้นที่มีความคงทนกว่ากระดาษกรองใยแก้ว (Glass Microfiber) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4) แบตเตอรี่มีค่าการคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยตัวเอง (Self Discharge) ที่สูงเนื่องมาจากการข้ามผ่านแผ่นกั้น (Separator) ของไอโอดีน ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งคือทำการใช้แผ่นกั้นชนิดอื่นที่ป้องกันการข้ามผ่านของไอโอดีนได้เช่น การใช้แผ่นกั้นแนฟฟิออน (Nafion) [56]



ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณและสมการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ผลของสัดส่วนโดยมวลของ โพลีเอทิลีน ไอโอดี/ไอโอดีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่สังกะสี-ไอโอดีแบบอัดประจุซ้ำได้

1. การคำนวณสำหรับการเตรียมขั้วแคโทด

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับการเตรียมขั้วแคโทดที่สัดส่วนโพลีเอทิลีน ไอโอดีต่อไอโอดี 1:1

จำนวนขั้วแคโทดที่ต้องการ 1 g

วิธีการคำนวณ จากสัดส่วนการผสม คาร์บอนกัมมันต์ ไอโอดีผสมโพลีเอทิลีน ไอโอดี ตัวช่วยในการนำไฟฟ้า และตัวประสานในอัตราส่วน 40: 40: 10: 10 โดยน้ำหนัก และสัดส่วน โพลีเอทิลีน ไอโอดีต่อไอโอดี เป็น 1:1

จะได้ คาร์บอนกัมมันต์	$= \frac{1 \times 40}{100} = 0.4 \text{ g}$
ไอโอดี	$= \frac{1 \times 40}{100} \times \frac{1}{2} = 0.2 \text{ g}$
โพลีเอทิลีน ไอโอดี	$= \frac{1 \times 40}{100} \times \frac{1}{2} = 0.2 \text{ g}$
ตัวช่วยในการนำไฟฟ้า	$= \frac{1 \times 10}{100} = 0.1 \text{ g}$
ตัวประสาน	$= \frac{1 \times 10}{100} = 0.1 \text{ g}$

2. การคำนวณสำหรับการเตรียมอิเล็กโทรไลต์

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ ZnSO_4 2M

จำนวนอิเล็กโทรไลต์ที่ต้องการ (V) 20 ml

ความเข้มข้นที่ต้องการ (C) 2 M

น้ำหนักโมเลกุลของ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Mw) 257.58 g/mol

วิธีการคำนวณ จากสมการ

$$C = \frac{\text{mol}}{V} = \frac{g}{Mw \times V}$$

แทนค่า

$$2 = \frac{g}{257.58 \times 0.02}$$

$$g = 10.3032 \text{ g}$$

จะได้ น้ำหนักของ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่ต้องใช้เท่ากับ 10.3032 g

3. การคำนวณค่ากระแสที่ใช้

กระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นกระแสที่เป็นอัตราการใช้งานของแบตเตอรี่ ตัวอย่างเช่น ที่กระแส 1C คือการอัดหรือคายประจุของแบตเตอรี่จนหมดในเวลา 1 ชั่วโมง 2C ครึ่งชั่วโมง และอื่นๆ

ตัวอย่างการคำนวณค่ากระแสที่ใช้ของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1

ค่าความจุ (Capacity) ของแบตเตอรี่เท่ากับ	0.79 mAh
จะต้องใช้กระแส ที่กระแส 1 C เท่ากับ	$A = 0.79 \times 1 = 0.79 \text{ mA}$
ที่กระแส 2 C เท่ากับ	$A = 0.79 \times 2 = 1.58 \text{ mA}$
ที่กระแส 3 C เท่ากับ	$A = 0.79 \times 3 = 2.37 \text{ mA}$
ที่กระแส 4 C เท่ากับ	$A = 0.79 \times 4 = 3.16 \text{ mA}$
ที่กระแส 6 C เท่ากับ	$A = 0.79 \times 6 = 4.74 \text{ mA}$

4. การคำนวณค่าคายประจุ (Specific Discharge Capacity)

ตัวอย่างการคำนวณค่าคายประจุของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1

ค่าความจุ (Capacity) ของแบตเตอรี่เท่ากับ	0.79 mAh
น้ำหนักของขั้วแคโทด เท่ากับ	0.0273 g
น้ำหนักของแผ่นแกรไฟต์ เท่ากับ	0.014 g
จะได้ น้ำหนักของคาร์บอน	

$$จ\text{ว} (0.0273 - 0.014) \times 0.4 = 0.0053 \text{ g}$$

นำมาคำนวณหาค่าคายประจุจะได้

$$\frac{0.79}{0.0053} = 149.06 \text{ mAh/g carbon}$$

5. การคำนวณประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ (Columbic Efficiency) และพลังงาน (Round-Trip Efficiency)

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุและพลังงานของสัดส่วนโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1

ประสิทธิภาพในการกักเก็บความจุ รอบที่ 1

แทนค่าจะได้

$$A = 0.1(12693.0) = 1269.3$$

$$B = 0.1(126.930) = 12.693$$

$$DF = (100 + 10)/10 = 11$$

จะได้ค่าไอโอดีนเท่ากับ $\frac{X}{M} = [A - (DF)(B)(S)]/M$

$$\frac{X}{M} = [1269.3 - (11)(12.693)(13)]/1$$

$$\frac{X}{M} = 906.28 \text{ mg/g}$$

7. การคำนวณค่าคายประจุคงเหลือ (Capacity Retention)

ตัวอย่างการคำนวณค่าคายประจุคงเหลือที่การใช้งานรอบที่ 1000 เมื่อเทียบกับการใช้งานรอบที่ 2 ของสัปดาห์โพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1

ค่าคายประจุคงเหลือที่การใช้งานรอบที่ 1000

$$\begin{aligned} \text{Capacity retention (\%)} &= \frac{\text{Specific discharge capacity at 1000 cycles (mAh/g carbon)}}{\text{Specific discharge capacity at 2 cycles (mAh/g carbon)}} \times 100\% \\ &= \frac{127.85}{144.65} \times 100\% \\ &= 88.4\% \end{aligned}$$

8. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ตามสมการของ Randles-Sevcik

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสัปดาห์โพแทสเซียมไอโอไดด์ต่อไอโอดีน 1:1

จากสมการของ Randles-Sevcik

$$i_{pc} = 2.69 \times 10^5 \times n^{3/2} \times A \times D^{1/2} \times C_0 \times V^{1/2}$$

โดยที่ i_{pc} = ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (A/cm²)

n = จำนวนอิเล็กตรอนของปฏิกิริยา (2)

A = พื้นที่ข่องผิวของขั้วไฟฟ้า (1.767 cm_2)

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของปฏิกิริยา (cm_2/s)

C_0 = ความเข้มข้นที่ใช้ (2)

V = อัตราการแสกน (V/s)

จากสมการเส้นตรง $y = mx + c$ เทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสสูงสุด กับ รากที่สองของอัตราแสกน จะได้

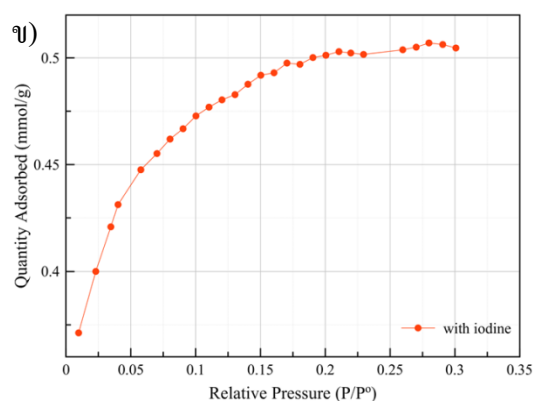
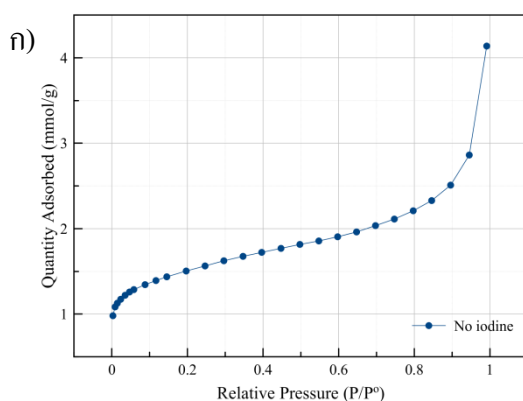
$$m (\text{slope}) = 2.69 \times 10^5 \times n^{3/2} \times A \times D^{1/2} \times C_0$$

แทนค่าจะได้

$$0.6458 = 2.69 \times 10^5 \times 2^{3/2} \times 1.767 \times D^{1/2} \times 2$$

$$D = 2.40 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$$

9. ไอโซเทอมของการดูดซับ



รูปที่ 17 ไอโซเทอมของการดูดซับ ก) ขั้วแคโทดที่ไม่มีไอโอดีน ข) ขั้วแคโทดที่ดูดซับไอโอดีนแล้ว

บรรณานุกรม

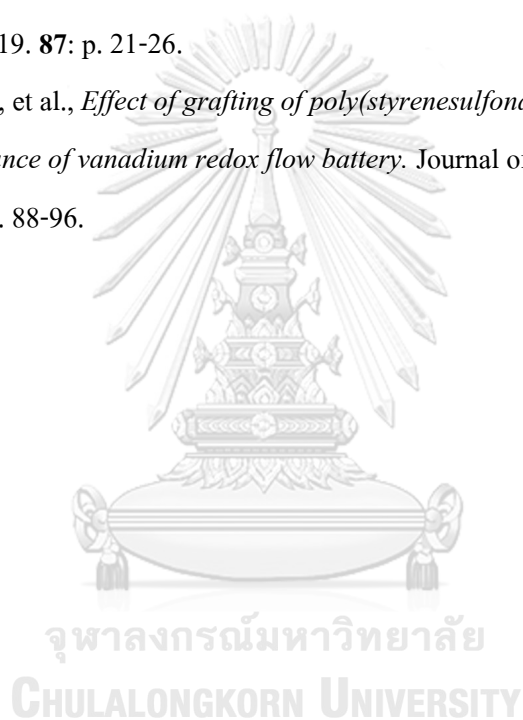
1. Lu, K., et al., *Sulfur and nitrogen enriched graphene foam scaffolds for aqueous rechargeable zinc-iodine battery*. *Electrochimica Acta*, 2019. **296**: p. 755-761.
2. Ming, J., et al., *Zinc-ion batteries: Materials, mechanisms, and applications*. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2019. **135**: p. 58-84.
3. Song, M., et al., *Recent Advances in Zn-Ion Batteries*. *Advanced Functional Materials*, 2018. **28**(41).
4. Liu, X., G.A. Elia, and S. Passerini, *Evaluation of counter and reference electrodes for the investigation of Ca battery materials*. *Journal of Power Sources Advances*, 2020. **2**.
5. Wang, L., et al., *Tailoring electrolyte additives for controlled Mg-Ca anode activity in aqueous Mg-air batteries*. *Journal of Power Sources*, 2020. **460**.
6. Ma, L., et al., *Initiating a wearable solid-state Mg hybrid ion full battery with high voltage, high capacity and ultra-long lifespan in air*. *Energy Storage Materials*, 2020. **31**: p. 451-458.
7. Zhao, Y., L. Wang, and H.R. Byon, *High-performance rechargeable lithium-iodine batteries using triiodide/iodide redox couples in an aqueous cathode*. *Nat Commun*, 2013. **4**: p. 1896.
8. Ito, S., et al., *Formation of a hydrophobic polyiodide complex during cathodic oxidation of iodide in the presence of propylene carbonate in aqueous solutions, and its application to a zinc/iodine redox flow battery*. *Electrochimica Acta*, 2019. **319**: p. 164-174.
9. Bai, C., et al., *A sustainable aqueous Zn-I₂ battery*. *Nano Research*, 2018. **11**(7): p. 3548-3554.
10. Root, M., *Battery book*. 2011: McGraw-Hill.
11. Li, H., et al., *Advanced rechargeable zinc-based batteries: Recent progress and future perspectives*. *Nano Energy*, 2019. **62**: p. 550-587.
12. YAMAMO, T., *Use of Polymer-Iodine Adducts as Positive Electrodes of Cells* J.C.S. CHEM. COMM, 1981: p. 187-188.
13. TAKAKAZU YAMAMOTO*, M.H.a.A.Y., *Zn IZnI₂ I Iodine !Secondary Battery Using Iodine Nylon-6 Adduct as Positive Electrode, and Its Charge-Discharge Performance*

- Inorganica Chimica Acta, 86 1984 p. L47-L49.
14. M HISHINUMA, T.I., *ZINC-IODINE SECONDARY CELL USING 6-NYLON OR POLY(ETHER) BASED ELECTRODE BASIC RESEARCH FOR INDUSTRIAL USE OF THE SECONDARY CELL* Electrochimica Acta, 1989. **35**: p. 255-261.
 15. Xie, C., et al., *A Long Cycle Life, Self-Healing Zinc-Iodine Flow Battery with High Power Density*. Angew Chem Int Ed Engl, 2018. **57**(35): p. 11171-11176.
 16. Li, B., et al., *Ambipolar zinc-polyiodide electrolyte for a high-energy density aqueous redox flow battery*. Nat Commun, 2015. **6**: p. 6303.
 17. Lee, J., et al., *Nanoconfinement of redox reactions enables rapid zinc iodide energy storage with high efficiency*. Journal of Materials Chemistry A, 2017. **5**(24): p. 12520-12527.
 18. Tedjar*, F., *Multilayer thin-film batteries with poly(vinyl alcohol)*. Journal of Power Sources, 1994. **48**: p. 285-291.
 19. Bao, W., et al., *Enhanced cyclability of sulfur cathodes in lithium-sulfur batteries with Na-alginate as a binder*. Journal of Energy Chemistry, 2013. **22**(5): p. 790-794.
 20. Xie, C., et al., *Highly stable zinc-iodine single flow batteries with super high energy density for stationary energy storage*. Energy & Environmental Science, 2019. **12**(6): p. 1834-1839.
 21. Godoi, F.C.d., et al., *Dependence of LiNO₃ decomposition on cathode binders in Li-S batteries*. Journal of Power Sources, 2015. **288**: p. 13-19.
 22. Wang, Z., et al., *CMC as a binder in LiNi_{0.4}Mn_{1.6}O₄ 5V cathodes and their electrochemical performance for Li-ion batteries*. Electrochimica Acta, 2012. **62**: p. 77-83.
 23. Baston, G., et al., *Radiation chemistry of aqueous iodine at low concentrations*. Radiation Physics and Chemistry, 2020.
 24. Elgrishi, N., et al., *A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry*. Journal of Chemical Education, 2017. **95**(2): p. 197-206.
 25. Cesiulis, H., et al., *The Study of Thin Films by Electrochemical Impedance Spectroscopy, in Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications*. 2016. p. 3-42.
 26. Bigoni, F., et al., *Sodium Alginate: A Water-Processable Binder in High-Voltage Cathode Formulations*. Journal of The Electrochemical Society, 2016. **164**(1): p. A6171-A6177.
 27. Yang, S., et al., *Hybrid humics/sodium carboxymethyl cellulose water-soluble binder for enhancing the electrochemical performance of a Li-ion battery cathode*. Powder

- Technology, 2019. **351**: p. 203-211.
28. Sun, J., et al., *Effect of poly (acrylic acid)/Poly (vinyl alcohol) blending binder on electrochemical performance for lithium iron phosphate cathodes*. Journal of Alloys and Compounds, 2019. **783**: p. 379-386.
 29. Cizmar, P., et al., *Simulated SEM images for resolution measurement*. Scanning, 2008. **30**(5): p. 381-91.
 30. Mohan, V.B., K. Jayaraman, and D. Bhattacharyya, *Brunauer–Emmett–Teller (BET) specific surface area analysis of different graphene materials: A comparison to their structural regularity and electrical properties*. Solid State Communications, 2020. **320**.
 31. BRETT, C.M.A.B.a.A.M.O., *ELECTROCHEMISTRY Principles, Methods, and Applications*. 1994, Departamento de Quimica, Universidade de Coimbra, Portuga: Oxford New York Tokyo OXFORD UNIVERSITY PRESS.
 32. Lu, K., et al., *A rechargeable iodine-carbon battery that exploits ion intercalation and iodine redox chemistry*. Nat Commun, 2017. **8**(1): p. 527.
 33. Li, Y., et al., *Rechargeable aqueous zinc-iodine batteries: pore confining mechanism and flexible device application*. Chem Commun (Camb), 2018. **54**(50): p. 6792-6795.
 34. Tatsanee Nuilerd, P.P., and Juntima Chungsiriporn*, *Pellet activated carbon production using parawood charcoal from gasifier by KOH activation for adsorption of iron in water*. Songklanakarin J. Sci. Techno, 2018: p. 264-270.
 35. Nunes, C.A. and M.C. Guerreiro, *Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers*. Química Nova, 2011. **34**(3): p. 472-476.
 36. Kacan, E., *Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal*. J Environ Manage, 2016. **166**: p. 116-23.
 37. Sun, J., et al., *The influential factors towards graphene oxides removal by activated carbons: Activated functional groups vs BET surface area*. Journal of Molecular Liquids, 2018. **271**: p. 142-150.
 38. Saka, C., *BET, TG–DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with ZnCl₂*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012. **95**: p. 21-24.
 39. Cambedouzou, J., et al., *Raman spectroscopy of iodine-doped double-walled carbon*

- nanotubes*. Physical Review B, 2004. **69**(23).
40. Tian, P., et al., *Solution processable high-performance infrared organic photodetector by iodine doping*. RSC Advances, 2016. **6**(51): p. 45166-45171.
 41. Cazayous, M., et al., *Iodine insertion in pentacene thin films investigated by infrared and Raman spectroscopy*. Physical Review B, 2004. **70**(8).
 42. Samek, O., et al., *Raman spectroscopy for the characterization of algal cells, in 17th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. 2010.
 43. Siyasukh, A., Y. Chimupala, and N. Tonanon, *Preparation of magnetic hierarchical porous carbon spheres with graphitic features for high methyl orange adsorption capacity*. Carbon, 2018. **134**: p. 207-221.
 44. Robertson, A.C.F.a.J., *Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon*. PHYSICAL REVIEW B, 1999. **VOLUME 61, NUMBER 20**: p. 95-107.
 45. Mohandoss, M., et al., *Solar mediated reduction of graphene oxide*. RSC Advances, 2017. **7**(2): p. 957-963.
 46. Barbera, K., et al., *Low-temperature graphitization of amorphous carbon nanospheres*. Chinese Journal of Catalysis, 2014. **35**(6): p. 869-876.
 47. Lazzarini, A., et al., *Graphitization of Activated Carbons: A Molecular-level Investigation by INS, DRIFT, XRD and Raman Techniques*. Physics Procedia, 2016. **85**: p. 20-26.
 48. Lu, K., et al., *Rechargeable potassium-ion batteries enabled by potassium-iodine conversion chemistry*. Energy Storage Materials, 2019. **16**: p. 1-5.
 49. Zhang, Q., et al., *Inclusion complexation enhanced cycling performance of iodine/carbon composites for lithium–iodine battery*. Journal of Power Sources, 2020. **463**.
 50. Zhang, G., et al., *Using core–shell interlinked polymer@C–iodine hollow spheres to synergistically depress polyiodide shuttle and boost kinetics for iodine-based batteries*. Journal of Materials Chemistry A, 2018. **6**(19): p. 9019-9031.
 51. Zhao, Q., et al., *Rechargeable Lithium-Iodine Batteries with Iodine/Nanoporous Carbon Cathode*. Nano Lett, 2015. **15**(9): p. 5982-7.
 52. Bobinihi, F.F., O.E. Fayemi, and D.C. Onwudiwe, *Synthesis, characterization, and cyclic voltammetry of nickel sulphide and nickel oxide nanoparticles obtained from Ni(II)*

- dithiocarbamate*. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021. **121**.
53. Li, Y., et al., *Quantifying the efficiency of o-benzoquinones reaction with amino acids and related nucleophiles by cyclic voltammetry*. *Food Chem*, 2020. **317**: p. 126454.
54. Leftheriotis, G., S. Papaefthimiou, and P. Yianoulis, *Dependence of the estimated diffusion coefficient of Li_xWO_3 films on the scan rate of cyclic voltammetry experiments*. *Solid State Ionics*, 2007. **178**(3-4): p. 259-263.
55. Walczak, K., A. Kulka, and J. Molenda, *Alluaudite- $\text{Na}_{1.47}\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_3$: Structural and electrochemical properties of potential cathode material for Na-ion Batteries*. *Solid State Sciences*, 2019. **87**: p. 21-26.
56. Yang, M.-C., et al., *Effect of grafting of poly(styrenesulfonate) onto Nafion membrane on the performance of vanadium redox flow battery*. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017. **807**: p. 88-96.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวุฒิ เหลืองทรงชัย
วัน เดือน ปี เกิด	31 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	ราชบุรี, ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	70 หมู่ 5 ตำบลดอนไผ่ อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี 70130



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY