

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเดนไดรต์สังกะสีโดยตัวคั่นเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์/ทังสเตนคาร์ไบด์
สำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอออน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

Suppression of zinc dendrite growth by cellulose nanofiber/tungsten separators for
zinc-ion batteries



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Defense Engineering and Technology
Faculty Of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การยับยั้งการเจริญเติบโตของเดนไดรต์สังกะสีโดยตัวคั่น เซลล์โลสนาโนไฟเบอร์/ทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับแบตเตอรี่ สังกะสีไอออน
โดย	น.ส.ภัทรพร วุฒาพาณิชย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร ว่างยาว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เจียเขียน ฉิน ศาสตราจารย์ ดร.พ.อ.หญิงสุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร ว่างยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.เจียเขียน ฉิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.พ.อ.หญิงสุวิมล เสนีวงศ์ ณ
อยุธยา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์หิรัญสกุล)

ภัทรพร วุฒาพาณิชย์ : การยับยั้งการเจริญเติบโตของเดนไดรต์สังกะสีโดยตัวคั่นเซลลูโลส
นาโนไฟเบอร์/ทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอออน. (Suppression of zinc
dendrite growth by cellulose nanofiber/tungsten separators for zinc-ion
batteries) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ปัญญาวัชร ว่างยาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.เจียเขียน
ฉิน,ศ. ดร.พ.อ.หญิงสุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา

ตัวคั่นวัสดุผสมทังสเตนคาร์ไบด์-เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNFs/WC separator) มีข้อดี
คือประหยัดต้นทุนและการเตรียมที่ง่ายขึ้น โดยตัวคั่นที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถลดศักยภาพของ
นิวเคลียสสังกะสีที่มากเกินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ตำแหน่งนิวเคลียสสังกะสีเป็นระเบียบ
ลดการกัดกร่อนบนพื้นผิว และส่งเสริมการสะสมของสังกะสีที่สม่ำเสมอ จึงทำให้แอโนดสังกะสีมี
ประสิทธิภาพสูง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวคั่น เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์บริสุทธิ์ (CNFs
separator) ตัวคั่น CNFs/WC จะยืดอายุรอบการใช้งานของแบตเตอรี่สมมาตรเป็น 1,200 ชั่วโมง
ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และเป็น 1,000 ชั่วโมงที่ 5 มิลลิ
แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้การใช้ $(\text{NH}_4)_2\text{V}_{10}\text{O}_{25}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (NVO) เป็นวัสดุแคโทด ทำให้มี
ความสามารถในการอัด-คายประจุเหนือกว่าที่ 132 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม คงความสามารถใน
การกักเก็บความจุที่ 85.2% หลังจากผ่านไป 500 รอบ ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 3 แอมป์ต่อ
กรัม โดยในขณะที่แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs ลดความจุลงอย่างรวดเร็วไปที 30 มิลลิแอมป์ชั่วโมง
ต่อกรัม ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการกลับตัวของวงจรและความเสถียรที่ยอดเยี่ยมของแอโนด
โดยตัวคั่น CNFs/WC

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการ	ลายมือชื่อนิสิต
	ป้องกันประเทศ	
ปีการศึกษา	2566	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6470060721 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORD: Zn-ion battery, separator, cellulose, tungsten carbide

Pattaraporn Woottapanit : Suppression of zinc dendrite growth by cellulose nanofiber/tungsten separators for zinc-ion batteries. Advisor: Asst. Prof. PANYAWAT WANGYAO Co-advisor: JIAQIAN QIN, Ph.D., Prof. Col.Suwimon Saneewong Na Ayuttaya

The WC-cellulose nanofiber composite separator (CNFs/WC separator) with the advantages of cost-efficiency and simplified preparation by a facile solution-casting method for a dendrite-free Zn anode. The fabricated CNFs/WC separator can efficiently lower the Zn nucleation overpotential, homogeneously the Zn nucleation sites, postpone surface corrosion, promote the uniform Zn deposition, and finally realize the high-performance Zn anode. Consequently, compared with the pure CNF separator (CNFs separator), the WCCNF separator vastly extends the cycling lifespan of the symmetric cell to 1,200 h at $1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ and 1,000 h at $5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Moreover, using $(\text{NH}_4)_2\text{V}_{10}\text{O}_{25}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (NVO) as the cathode material, the full cell with the CNFs/WC separator shows a superior discharge capacity of $132 \text{ mA h}\cdot\text{g}^{-1}$ with a capacity retention of 85.2% after 500 cycles at $3 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$, whereas the one with CNFs rapidly degrade the capacity to $30 \text{ mA h}\cdot\text{g}^{-1}$, indicating the excellent cycling reversibility and stability of the Zn anode endowed by the WCCNF separator.

Field of Study: Defense Engineering and
Technology

Academic Year: 2023

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งต่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมทั้งสองท่าน คือ พ.อ.หญิง ศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา และดร.เจียเขียน ฉิน สำหรับการสนับสนุน และคำแนะนำที่ดีอย่างสม่ำเสมอ และต่อเนื่อง ที่ปรึกษาทั้งสามท่านคอยให้กำลังใจและชี้นำไปในทิศทางที่ถูกต้องสำหรับทุกปัญหา ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการทดลอง หรือเรื่องการให้คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ และการเขียนวารสารงานวิจัย เป็นอย่างดียิ่ง ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ปานสุข ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย และกรรมการ/ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์ศิริสุกุล สำหรับการรับฟังวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในมุมมองที่แตกต่างออกไป ขอขอบคุณ ดร.เจิงอู๋ หยาง และดร.จิน เฉา สำหรับคำอธิบายทางด้านแบตเตอรี่, วัสดุศาสตร์ และการเขียนวารสารงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน จากห้องปฏิบัติการทดลอง QIN'S LAB ที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นางสาวกิตติมา โล่ห์พิมาน, ร.ท.ธนภูมิ มะวิญชร, นางสาวนภัส เกียรติวิศาลกิจ และนางสาวจิงจิง หนิว ที่ให้การสนับสนุนและให้ข้อเสนอแนะกับข้าพเจ้า ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุสำหรับการเอื้อเฟื้อ สถานที่และเครื่องมือในการทำการทดลองให้ เป็นไปได้อย่างราบรื่นตลอดมา และขอขอบคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดนั่นคือ พ่อ-แม่ และครอบครัว

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
ส่วนประกอบต่างๆของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน.....	2
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่2 การทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.1 ระบบกักเก็บพลังงาน.....	5
2.2 แบตเตอรี่.....	6
2.3 แบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน.....	7
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสี ในแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน 8	
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสี โดยวิธีการดัดแปลงวัสดุ ขั้วแอโนด (Anode modification).....	8
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสี โดยวิธีการดัดแปลง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte modification).....	9

2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสี โดยวิธีการดัดแปลงตัวคั่น (Separator modification).....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 การเตรียมส่วนประกอบแบตเตอรี่.....	34
3.1.1 สารเคมี, วัสดุ, อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบที่ใช้ในการทดลอง	34
3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวคั่น CNFs/WC	35
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์)	35
3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมแคโทด NVO_D [52]	35
3.2 การประกอบแบตเตอรี่.....	36
3.2.1 การประกอบแบตเตอรี่สมมาตร $Zn Zn$	36
3.2.2 การประกอบแบตเตอรี่สมมาตร $Zn Ti$	36
3.2.3 การประกอบแบตเตอรี่ $Zn NVO_D$	36
3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมแคโทด	37
3.3 การประกอบ และทดสอบแบตเตอรี่.....	37
3.3.1 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ($Zn Zn$)	37
3.3.2 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม ($Zn Ti$)	38
3.3.3 การทดสอบแบตเตอรี่ ($Zn NVO_D$ full batteries).....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	39
4.1 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ($Zn Zn$ batteries)	39
4.2 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม ($Zn Ti$ batteries)	64
4.3 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสี-NVO ($Zn NVO$ full batteries)	66
4.4 การทดสอบแบตเตอรี่ $Zn NVO$ แบบกระเป๋ (Pouch cell).....	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย	73

5.1.1 การทดสอบเพื่อหาปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่สุด.....	74
5.1.2 การทดสอบเพื่อหาปริมาณทังสเตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม.....	78
ประวัติผู้เขียน	85



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ปัจจุบันแหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก [1] แม้จะมีแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ หรือพลังงานแสงอาทิตย์ แต่เนื่องจากเราไม่สามารถควบคุมแหล่งพลังงานจากธรรมชาติได้ทั้งหมด ดังนั้นแบตเตอรี่จึงเป็นอุปกรณ์สำคัญที่จะกักเก็บพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ เพื่อสามารถใช้พลังงานที่เหล่านี้ได้ตลอดเวลา โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ขาดแคลนพลังงาน [2] และมีประสิทธิภาพการกักเก็บ พลังงานที่ดีเยี่ยม ทำให้แบตเตอรี่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลาย [3] ในปัจจุบันแบตเตอรี่ (Batteries) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy storage devices) ที่ได้รับความสนใจมากขึ้นเพื่อช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านปัญหาสิ่งแวดล้อม, ปัญหาภาวะโลกร้อน และปัญหามลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel energy) [4]

โดยสามารถแบ่งแบตเตอรี่ได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ (Primary battery) และแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ (Secondary battery) โดยแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ [5] ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reactions) ในแบตเตอรี่จะสามารถย้อนกลับได้ เรียกว่าแบตเตอรี่แบบชาร์จซ้ำได้ซึ่งแตกต่างจากแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิที่ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีไม่สามารถย้อนกลับได้ จึงไม่สามารถชาร์จไฟซ้ำได้

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (LIBs) เป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิ ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีค่าความจุ (Capacity) และความหนาแน่นพลังงานสูง (Energy density) แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ราคาแพง และต้นทุนการผลิตที่สูง [6] จึงทำให้เริ่มมีการศึกษา ค้นคว้า และทดลองแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆมากขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้

หนึ่งในนั้นคือ แบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน (ZIBs) เป็นหนึ่งในแบตเตอรี่ชนิดชาร์จซ้ำได้ ที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก [7] เนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่า เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า และในประเทศไทยมีแหล่งแร่สังกะสีอยู่เป็นจำนวนมาก แบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออนมีค่าความจุกราวิเมตริกทางทฤษฎี (Theoretical gravimetric capacity) สูงที่ 820 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม ความจุเชิงปริมาตรทางทฤษฎี (Theoretical volumetric capacity) สูงที่ 5855 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [8] ซึ่งข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องของแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟ ได้แก่แต่ละชนิดแสดงไว้ใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบไอออนของพาหะชนิดต่างๆ [8]

CHARGE CARRIER	ELECTRODE POTENTIAL VS SHE [V]	SHANNON'S IONIC RADII [Å]	SPECIFIC GRAVIMETRIC CAPACITY [MAH G ⁻¹]	SPECIFIC VOLUMETRIC CAPACITY [MAH CM ⁻³]
Li ⁺	-3.04	0.76	3862	2066
Na ⁺	-2.71	1.02	1166	1129
K ⁺	-2.93	1.38	685	586
Mg ²⁺	-2.37	0.72	2205	3832
Ca ²⁺	-2.87	1.00	1337	2072
Zn ²⁺	-0.76	0.74	820	5855
Al ³⁺	-1.66	0.535	2980	8056

ส่วนประกอบต่างๆของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน [9]

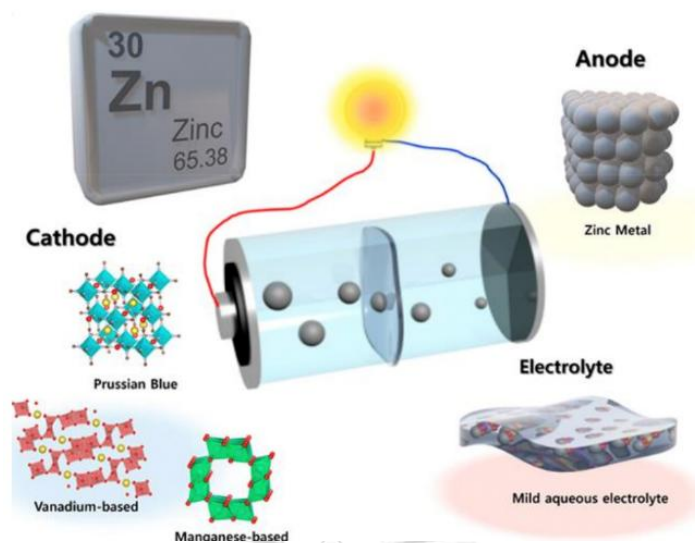
1.) ตัวรับกระแส (Current collectors) จากวัสดุพอลิเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel foils), คาร์บอนเคลือบบนเหล็ก (Carbon coated steel foils), ฟอยล์ไทเทเนียม (Titanium foils) และแผ่นกราฟไฟต์ (Graphite papers)

2.) ขั้วแคโทด (Cathode materials) วัสดุที่ถูกนำมาใช้ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดสำหรับในวิทยานิพนธ์นี้คือ วัสดุ $(\text{NH}_4)_2\text{V}_{10}\text{O}_{25}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (NVO₅)

3.) ขั้วแอโนด (Anode materials) เลือกใช้เป็นแผ่นฟอยล์สังกะสี (Zinc foils) ความหนา 0.1 มิลลิเมตร

4.) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) คือสารละลาย สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์

5.) ตัวคั่น (Separators) โดยจะคั่นอยู่ระหว่างกลางของขั้วแอโนด และขั้วแคโทด เพื่อป้องกันการลัดวงจร โดยในวิทยานิพนธ์นี้ เราสนใจศึกษาและพัฒนาในส่วนของตัวคั่น [9]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน [8]

แต่เนื่องจากความเสียหาย ที่เกิดขึ้นจากการเติบโตของเดนไดรต์บนผิวขั้วแอโนด สามารถทะลุตัวคั่นไปสัมผัสกับขั้วแคโทด ทำให้เกิดการลัดวงจร [10, 11] ส่งผลให้แบตเตอรี่เสียหาย และมีอายุการใช้งานที่สั้น ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขปัญหาการเติบโตของเดนไดรต์สังกะสี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ชนิดสังกะสีไอออน ให้อายุการใช้งานนานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการเติมทั้งสแตนคาร์ไบต์ในตัวคั่นต่อสัณฐานของขั้วแอโนดสังกะสี

1.2.2 เพื่อประกอบแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออนที่มีการเติมทั้งสแตนคาร์ไบต์ในตัวคั่น ได้สำเร็จ และสามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น

1.2.3 เพื่อแก้ไขปรับปรุงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี ของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออนโดยการเติมทั้งสแตนคาร์ไบต์ในตัวคั่น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทดสอบหาอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (15, 20 และ 25 กรัม) และ ทั้งสแตนคาร์ไบต์ (0.025, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 กรัม) ที่เหมาะสมที่สุด

1.3.2 ศึกษาผลของการเติมทั้งสแตนคาร์ไบต์ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผิวขั้วสังกะสี ทั้งก่อน-หลังการใช้งานแบตเตอรี่ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (เลือกวิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ และ ทั้งสแตนคาร์ไบต์ที่เหมาะสมที่สุด)

1.3.3 X-ray Diffractometer (XRD) จะถูกใช้ในการวิเคราะห์ขั้วแอโนดสังกะสีทั้งก่อน-หลังการใช้งาน (เลือกวิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ และทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด)

1.3.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าเคมี โดยการใช้เครื่องโพเทนชิออสแตท (Potentiostat) (เลือกวิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ และทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด)

1.3.5 วิเคราะห์ความเสถียร และอายุการใช้งาน โดยทำการทดสอบทั้งหมด ดังนี้ (เลือกวิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ และทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด)

- แบตเตอรี่แบบสมมาตร (Zn||Zn) ทดสอบ Plating/Stripping performance ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการเกิดเดนไดรต์สังกะสี บนขั้วแอโนดสังกะสี และศึกษาปฏิกิริยาการไป-กลับของไอออนสังกะสี (Zn^{2+})

- แบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม (Zn||Ti batteries) เพื่อทดสอบค่าประสิทธิภาพคูลอมบิก (Columbic efficiency) โดยใช้เครื่องทดสอบประสิทธิภาพแบตเตอรี่ (BTS battery tester)

- แบตเตอรี่สังกะสี - $(NH_4)_2V_{10}O_{25} \cdot 8H_2O$ (Zn|| NVO_D full batteries) โดยใช้เครื่องทดสอบประสิทธิภาพแบตเตอรี่ (BTS battery tester) เพื่อวิเคราะห์ความเสถียรต่อรอบ (Cyclability), Rate performance

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถยับยั้งการโตของเดนไดรต์สังกะสี ที่เกิดขึ้นบนผิวของแอโนดสังกะสี ในแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน และสามารถส่งผลในเรื่องของการเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออนได้

บทที่2 การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบกักเก็บพลังงาน

ชนิดของระบบกักเก็บพลังงานแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ [12]

2.1.1 การจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าเคมี (Electrochemical energy storage system)

- แบตเตอรี่ (Batteries) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่นิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน [4]

- แบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน (Flow Batteries) รีดอกซ์โพลีเมอร์ แบตเตอรี่ (Redox Flow Battery) หมายถึง เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดหนึ่งที่พลังงานเคมีเกิดขึ้นจากส่วนประกอบทางเคมีของ 2 สารละลาย ที่อยู่ในสถานะของเหลวซึ่งสูบผ่านระบบโดยแยกด้านของเมมเบรน (Membrane) การแลกเปลี่ยนไอออน และการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นผ่านเมมเบรนในขณะที่ของเหลวทั้งสองไหลเวียนอยู่ในพื้นที่ของตัวเอง

- ไฮโดรเจน (Hydrogen)

2.1.2 การจัดเก็บพลังงานกล (Mechanical energy storage system)

- ล้อตุ้มกำลัง (Flywheels) ในปัจจุบันล้อตุ้มกำลัง จะจัดเก็บพลังงานทางกลไก และถ่ายโอนเข้า-ออกจากล้อตุ้มกำลังโดยมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในตัว ล้อตุ้มถูกแทนที่ด้วยโรเตอร์เหล็กหรือคอมโพสิต และมีการนำตลับลูกปืนแม่เหล็กมาใช้ ทุกวันนี้ล้อตุ้มกำลังถูกใช้เป็นที่เก็บ UPS เสริมในหลายอุตสาหกรรมทั่วโลก การใช้งานในอนาคตจะขยายออกไปอย่างหลากหลาย รวมถึงยานยนต์ไฟฟ้า [13]

- ระบบอัดกำลัง (Compressed air system) คือระบบที่เกี่ยวข้องกับการสร้างลมเป็นเครื่องมือ และแหล่งกำเนิดในกระบวนการผลิต โดยมีหน้าที่ผลิตลมอัดอากาศ และส่งต่อให้เครื่องมืออื่น ๆ

- ป้อนน้ำ (Pumped hydro) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับในเชิงพาณิชย์ และเป็นที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์สำหรับการจัดเก็บไฟฟ้าในระดับสาธารณูปโภค ถูกนำมาใช้ตั้งแต่นั้นปี 1890 ไฟฟ้าพลังน้ำไม่ได้เป็นเพียงแหล่งพลังงานหมุนเวียน และยังยืนเท่านั้นแต่ความยืดหยุ่น และความจุของพลังงานยังทำให้สามารถปรับปรุงเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้าและสนับสนุนการปรับใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ ที่ไม่ต่อเนื่อง [14]

2.1.3 การจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy storage system)

- ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ทำหน้าที่เก็บพลังงานในสนามไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นระหว่างคู่ฉนวน โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน แต่มีชนิดของประจุตรงข้ามกัน บางครั้งเรียกตัวเก็บประจุนี้ว่าคอนเดนเซอร์ (Condenser) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในงานอิเล็กทรอนิกส์ และพบได้แทบทุกวงจร

- ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor) มีความหนาแน่นของพลังงานสูง และทนทานเป็นพิเศษ [15]

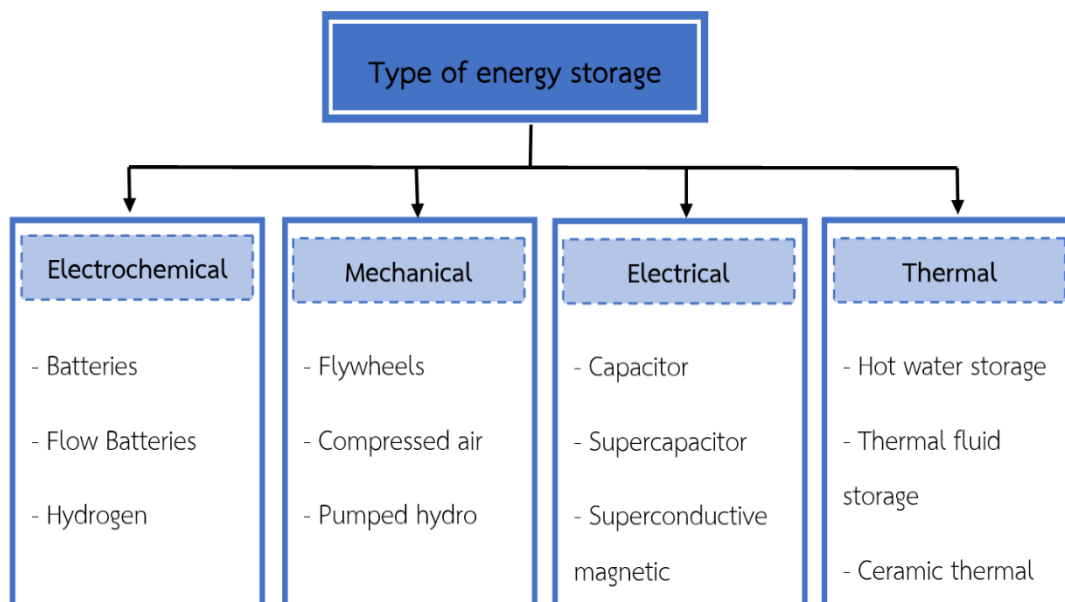
- ตัวนำแม่เหล็กยิ่งยวด (Superconductive magnetic)

2.1.4 การจัดเก็บพลังงานความร้อน (Thermal energy storage system)

- ที่เก็บน้ำร้อน (Hot water storage)

- ที่เก็บของเหลวระบายความร้อน (Thermal fluid storage)

- ที่เก็บความร้อนเซรามิก (Ceramic thermal storage)



รูปที่ 2 ประเภทของระบบกักเก็บพลังงาน [12]

2.2 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) คือ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) ตั้งแต่หนึ่งเซลล์ขึ้นไป โดยแต่ละเซลล์มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีที่สะสมไว้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเซลล์ไฟฟ้าเคมี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) อย่างน้อยสองขั้วที่ทำจากวัสดุที่นำไฟฟ้า และอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยมีตัวคั่น (Separator) คั่นอยู่ระหว่างกลางของขั้วทั้งสอง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง โดยทิศทางการเคลื่อนที่ที่ขึ้นกับสมบัติของขั้วไฟฟ้า และอิเล็กโทรไลต์ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องระหว่างขั้วทั้งสอง

ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีผ่านตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่นำไปใช้งานได้ โดยแบตเตอรี่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ และแบตเตอรี่ทุติยภูมิ [5]

2.2.1 แบตเตอรี่ปฐมภูมิ

เป็นแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถชาร์จไฟซ้ำได้ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีคือ สามารถกักเก็บพลังงานได้สูง อายุการใช้งานยาวนาน พร้อมใช้งานทันที และมีค่าพลังงานจำเพาะที่สูง แต่เนื่องจากการที่ไม่สามารถชาร์จไฟซ้ำได้ทำให้กลายเป็นขยะ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.2.2 แบตเตอรี่ทุติยภูมิ

เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาชาร์จประจุใหม่ได้โดยอาศัยหลักการของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่สามารถย้อนกลับได้ [5] เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่มือถือ และอุปกรณ์ต่างๆอีกมากมาย

2.2.3 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่

- ขั้วลบ หรือ แอโนด (Anode) เป็นขั้วที่เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับอิเล็กโทรไลต์แล้วจะให้อิเล็กตรอน
- ขั้วบวก หรือ แคโทด (Cathode) เป็นขั้วที่เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับอิเล็กโทรไลต์แล้ว จะเกิดสมบัติในการรับอิเล็กตรอน
- อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารที่อาจอยู่ในสถานะใดก็ได้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารละลายที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ ที่พร้อมเคลื่อนที่หรือนำกระแสไฟฟ้า
- ตัวคั่น (Separator) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่คั่นระหว่างขั้วสองขั้ว และป้องกันการเกิดปฏิกิริยากัน ซึ่งส่งผลให้แบตเตอรี่เกิดการลัดวงจร

2.3 แบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน

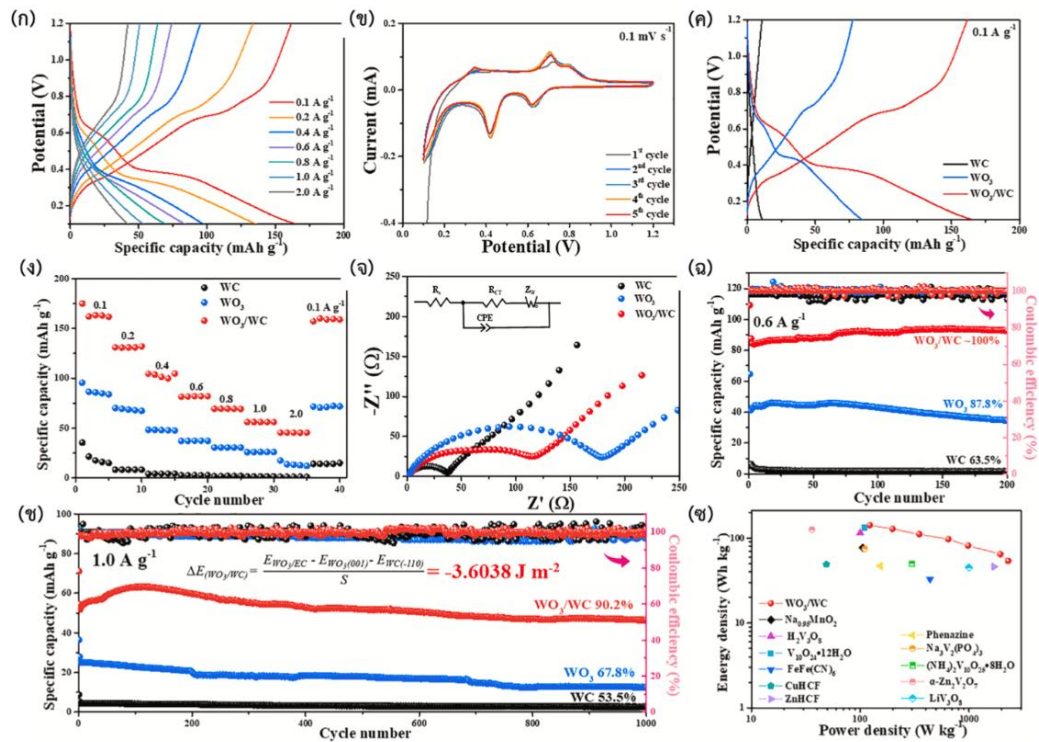
2.3.1 ปัญหาของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน

การแก้ไขปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสีบนขั้วแอโนดเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมาก ต่อการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน เนื่องจากปัญหาเดนไดรต์ของแบตเตอรี่ที่ใช้สังกะสีเป็นหลัก ส่งผลกระทบต่ออายุ การใช้งานที่ลดลงอย่างมาก ความหนาแน่นกระแส (Current density) และค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน (Overpotential) ที่เพิ่มมากขึ้น เดนไดรต์สังกะสีเป็นปัญหาอย่างมากเมื่อใช้งานภายใต้ความหนาแน่น กระแสสูง (High current density) และ/หรือมีความจุที่สูง [16] โดยสามารถสรุปการแก้ปัญหา และปรับปรุงพัฒนาปัญหาการเกิดเดนไดรต์บนขั้วแอโนดสังกะสี ในแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน จากงานวิจัยของคณะนักวิจัยต่างๆ ได้ 3 วิธีการหลัก คือ วิธีการดัดแปลงขั้วแอโนด (Anode modification), วิธีการดัดแปลงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte modification) และวิธีการดัดแปลงตัวคั่น (Separator modification)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสี ในแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสี โดยวิธีการดัดแปลงวัสดุขั้วแอโนด (Anode modification)

แบตเตอรี่สังกะสีไอออน (ZIBs) ได้รับการยอมรับว่าเป็นคู่แข่งที่สำคัญที่สุดของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน เนื่องจากมีปริมาณแร่สังกะสีสำรองที่มาก มีความปลอดภัยที่ดี และราคาขม่อมเยา อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตของเดนไดรต์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ และการใช้งานต่ำมาก (<5%) ของแอโนดสังกะสี จำกัดการใช้งานจริง Jin Cao และคณะ [17] ได้ทำการพัฒนาแบตเตอรี่สังกะสีไอออน ให้มีความเสถียร และอายุการใช้งานให้ดีขึ้น โดยการใช้ทังสเตนออกไซด์/คาร์ไบด์ (WO_3/WC) ลูกผสมต่างกันหลายชั้น ที่มีการจับคู่การถ่ายโอนประจุที่ดีเป็นขั้วแอโนด โดยใช้ แมงกานีสไดออกไซด์/กราฟไฟท์ เป็นขั้วแคโทด ส่งผลให้มีความจุของแบตเตอรี่สังกะสีไอออนเพิ่มมากถึง 164 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม ทดสอบที่ 0.1 แอมป์ต่อกรัม พร้อมศึกษาภาพการแทรกสอด สังกะสีไอออนที่เหมาะสมที่ 0.43 โวลต์ (เทียบกับ Zn^{2+}/Zn) อายุการใช้งาน 90.2% หลังจาก 1,000 รอบ ภายใต้อายุ 1 แอมป์ต่อกรัม และพฤติกรรมแทรกกลับของ สังกะสีไอออนให้มีความจุที่ยอดเยี่ยมถึง 69 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม ที่ 0.1 แอมป์ต่อกรัม ความเสถียรของวงจรที่ (100% หลังจาก 10,000 รอบ) และความหนาแน่นของพลังงานพิเศษที่ 85 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ถูกสร้างขึ้นผ่านการเผาผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่เป็นสารตั้งต้น ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของทังสเตนออกไซด์/คาร์ไบด์ ที่มีคุณภาพสูงด้วยทังสเตนออกไซด์ ที่มีลักษณะคล้ายกลีบดอก ที่ประกอบจากเกล็ดนาโน และช่องว่างจำนวนมากที่สร้างขึ้นใน ทังสเตนออกไซด์แบบซ้อน ซึ่งเอื้อต่อการแทรกตัวของไอออน และการสกัดลูกผสมต่างชนิดกันของทังสเตนออกไซด์/คาร์ไบด์

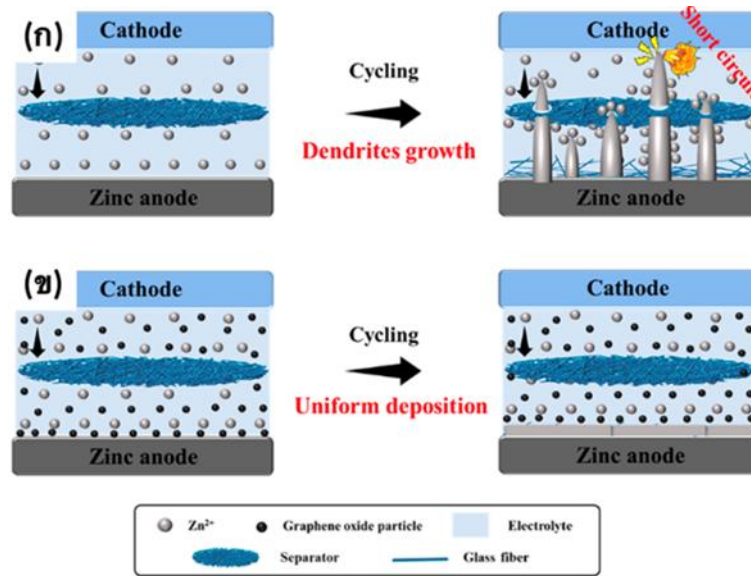


รูปที่ 3 การดำเนินการทางไฟฟ้าเคมีของ WO_3/WC ในแบตเตอรี่สังกะสีไอออน (ก) รูปแบบ GCD (ข) เส้นโค้ง CV ในรอบที่แตกต่างกัน (ค) รูปแบบ GCD ภายใต้ 0.1 แอมป์ต่อกรัม (ง) Rate performance (จ) EIS (ฉ) Cycling performance ที่ 0.6 แอมป์ต่อกรัม (ช) Cycling performance ที่ 1.0 แอมป์ต่อกรัม และ (ซ) Ragone plots ของ WO_3/WC -ZIBs เปรียบเทียบกับแคโทดก่อนหน้า [17]

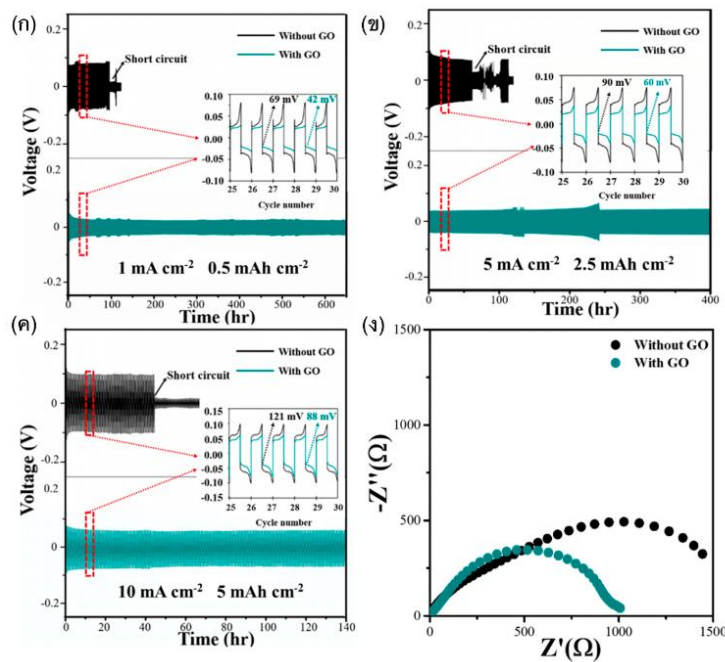
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการเกิดเดนไดรต์สังกะสี โดยวิธีการดัดแปลงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte modification)

ในงานวิจัยของ Jufni Abdulla และคณะ [18] ได้ศึกษาวิจัย การเติมกราฟีนออกไซด์ในอิเล็กโทรไลต์ การยับยั้งการก่อตัวของเดนไดรต์ของขั้วสังกะสีแอโนด เนื่องจากการเติบโตของเดนไดรต์สังกะสี ทำให้เกิดการลัดวงจร และส่งผลให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้นคณะนักวิจัย จึงได้ทดลองเติมกราฟีนออกไซด์ (GO) ลงในสารละลายซิงค์ซัลเฟต ความเข้มข้น 2 M (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์) เพื่อทำให้เกิดอิเล็กโทรไลต์แบบไฮบริดที่ผสมกราฟีนออกไซด์ ซึ่งสามารถเพิ่มความเสถียร และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยมีประสิทธิภาพ Coulombic มากถึง 99.16% ดังแสดงในรูปที่ 4

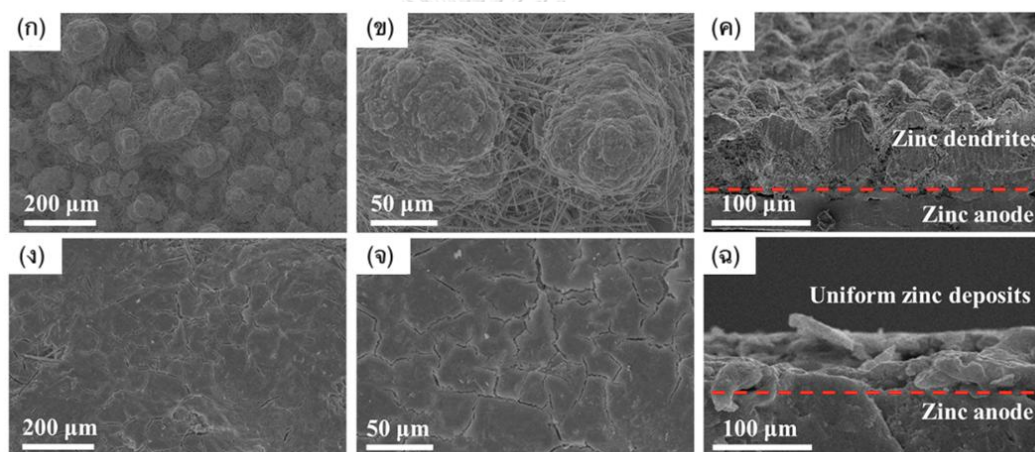


รูปที่ 4 แสดงภาพจำลอง (ก) พฤติกรรมการเติบโตของเดนไดรต์สังกะสี จนทำให้เกิดการลัดวงจร และ (ข) กราฟีนออกไซด์ทำให้เกิดการทับถมกันอย่างสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันการเติบโตของเดนไดรต์ [18]



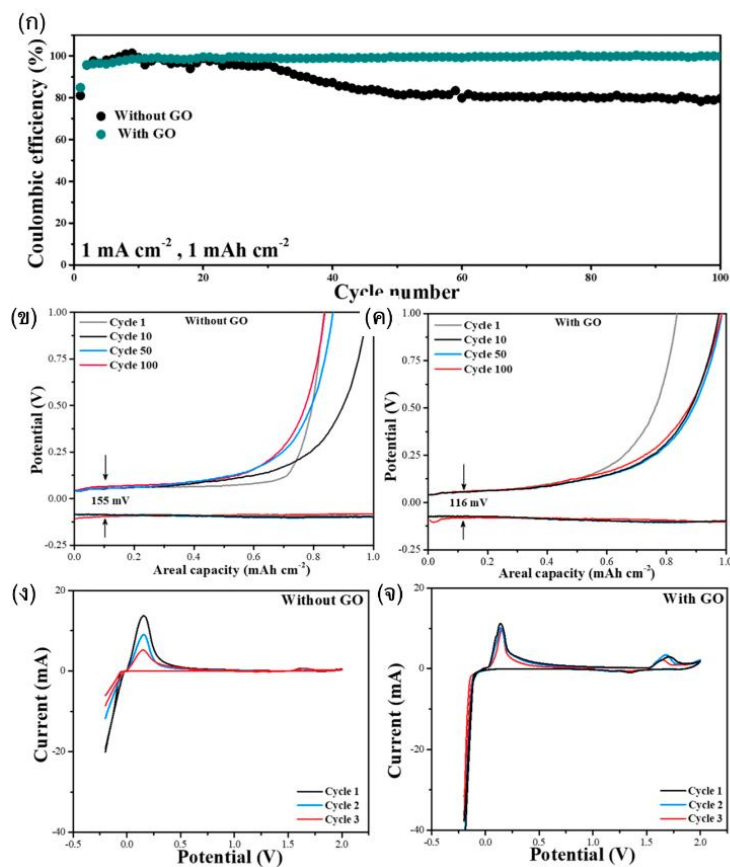
รูปที่ 5 การตรวจสอบปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของขั้วสังกะสีแอโนด ของอิเล็กโทรไลต์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ ที่ความหนาแน่นกระแส (ก) 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ข) 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ค) 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ (ง) การวัด EIS ของแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ [18]

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบแบตเตอรี่สมมาตร (Zn||Zn) ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ (0.12 wt%) ให้อายุการใช้งานที่ยาวนานเป็นพิเศษ ถึง 650 ชั่วโมง โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินระหว่างกระบวนการ Plating/Peeling ต่ำ อยู่ที่ 42 มิลลิโวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผสมกราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีอายุการใช้งานที่เพียง 96 ชั่วโมง และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินสูงถึง 96 มิลลิโวลต์ เนื่องจาก เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงในอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้มีความต้านทานการถ่ายโอนประจุที่ต่ำลง โดยผลการทดสอบ EIS สามารถยืนยันเพิ่มเติมได้ว่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ ลดลงเหลือ 950 โอห์ม จาก 1,790 โอห์ม รูปที่ 5(ง)



รูปที่ 6 (ก และ ข) ภาพ SEM ของสังกะสีแอโนดที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผสมกราฟีนออกไซด์
 (ค) ภาพตัดขวางของสังกะสีแอโนดที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผสมกราฟีนออกไซด์ หลังจาก 200 รอบ
 (ง และ จ) ภาพ SEM ของสังกะสีแอโนดที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ และ
 (ฉ) ภาพตัดขวางของสังกะสีแอโนดที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์หลังจาก 200 รอบ [18]

สัณฐานวิทยาของพื้นผิวสังกะสีแอโนด จากรูปที่ 6(ข) จะเห็นได้ว่าการเกิดเดนไดรต์อย่างชัดเจน และสามารถประมาณความสูงของตัวเดนไดรต์ได้ประมาณ 40 μm จากภาพตัดขวางในรูปที่ 6(ค) โดยที่เดนไดรต์สังกะสีสามารถสะสม และทำให้เกิดการลัดวงจรในแบตเตอรี่ได้ แต่การเติมกราฟีนออกไซด์ลงในอิเล็กโทรไลต์ สามารถส่งเสริมการเกิดนิวเคลียสของสังกะสีที่สม่ำเสมอ โดยกราฟีนออกไซด์สามารถสร้างสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอบนพื้นผิวของขั้วสังกะสีแอโนด ป้องกันการกระจายสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การลัดวงจรอย่างรวดเร็ว และยับยั้งการก่อตัวของเดนไดรต์



รูปที่ 7 (ก) ประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุ(CE), GCD profiles ของแบตเตอรี่ Zn||Ti (ข) อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผสมกราฟีนออกไซด์ (ค) อิเล็กโทรไลต์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ (ง) เส้นโค้ง CV ของแบตเตอรี่ Zn||Ti อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผสมกราฟีนออกไซด์ และ (จ) เส้นโค้ง CV ของแบตเตอรี่ Zn||Ti อิเล็กโทรไลต์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ [18]

การเติมกราฟีนออกไซด์ลงในอิเล็กโทรไลต์ ในแบตเตอรี่ Zn||Ti ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุ (CE) สูงขึ้นที่ 99.16% และศักย์ภาพการเกิดนิวเคลียส ที่ต่ำกว่า 116 มิลลิโวลต์ ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการย้อนกลับสูง และความเสถียรของขั้วแอโนดสังกะสี โดยประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้นนี้ เป็นผลมาจากการเกิดนิวเคลียสที่สม่ำเสมอของ สังกะสีไอออนและการเกิดนิวเคลียสที่มากเกินไปลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นโดยโพรไฟล์ GCD ที่เสถียรมากขึ้น และเส้นโค้ง CV ที่ดีขึ้น

การเติมกราฟีนออกไซด์ลงในอิเล็กโทรไลต์ สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์ ทำให้แอโนดสังกะสีเสถียร นำไปสู่การสะสมของสังกะสีที่สม่ำเสมอ และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น 5 เท่า และมีประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้น

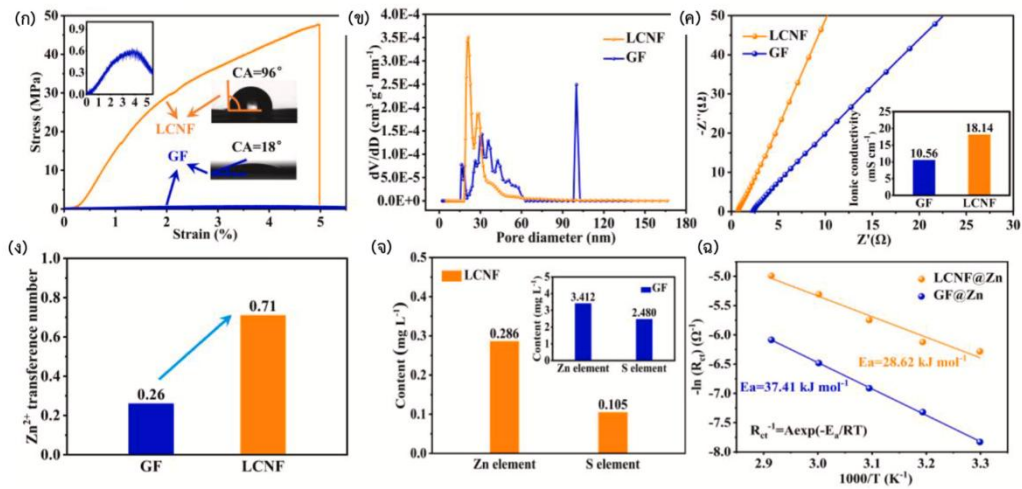
2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาคัดแยกเดนไดรต์สังกะสี โดยวิธีการดัดแปลงตัวคั่น (Separator modification)

Zhenglin Li และคณะ [19] เห็นว่าการพัฒนาอย่างยั่งยืนของแบตเตอรี่สังกะสีไอออนแบบชาร์จซ้ำได้ นั้นถูกจำกัดอย่างมากโดยการเจริญเติบโตของเดนไดรต์สังกะสีที่ควบคุมไม่ได้ และปฏิกิริยาข้างเคียงบนขั้วแอโนด จึงได้พัฒนาตัวคั่นจากเส้นใยนาโนลิกโนเซลลูโลส (LCNF) ที่ผลิตจากกากปาล์ม ดังรูปที่ 8 เพื่อการพัฒนาสำหรับแอโนดสังกะสีที่ปราศจากเดนไดรต์ ตัวคั่นจากเส้นใยนาโนลิกโนเซลลูโลส มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (96°) มีรูพรุนระดับนาโนที่สม่ำเสมอ (~ 20 นาโนเมตร) ประสิทธิภาพเชิงกลที่ดีเยี่ยม (47.8 เมกะปาสกาล) และการนำไฟฟ้าไอออนิกสูง (18.1 มิลลิวินาทีต่อเซนติเมตร) ดังนั้น ตัวคั่นนาโนลิกโนเซลลูโลส ช่วยเพิ่มจลนพลศาสตร์ของการสะสมสังกะสี และลดสิ่งกีดขวางการละลายของไอออนสังกะสีไฮเดรต ยับยั้งการเจริญเติบโตของเดนไดรต์สังกะสี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และส่งเสริมการชุบ/ลอกสังกะสี (Plating/Stripping) ที่สม่ำเสมอบนแอโนดสังกะสี



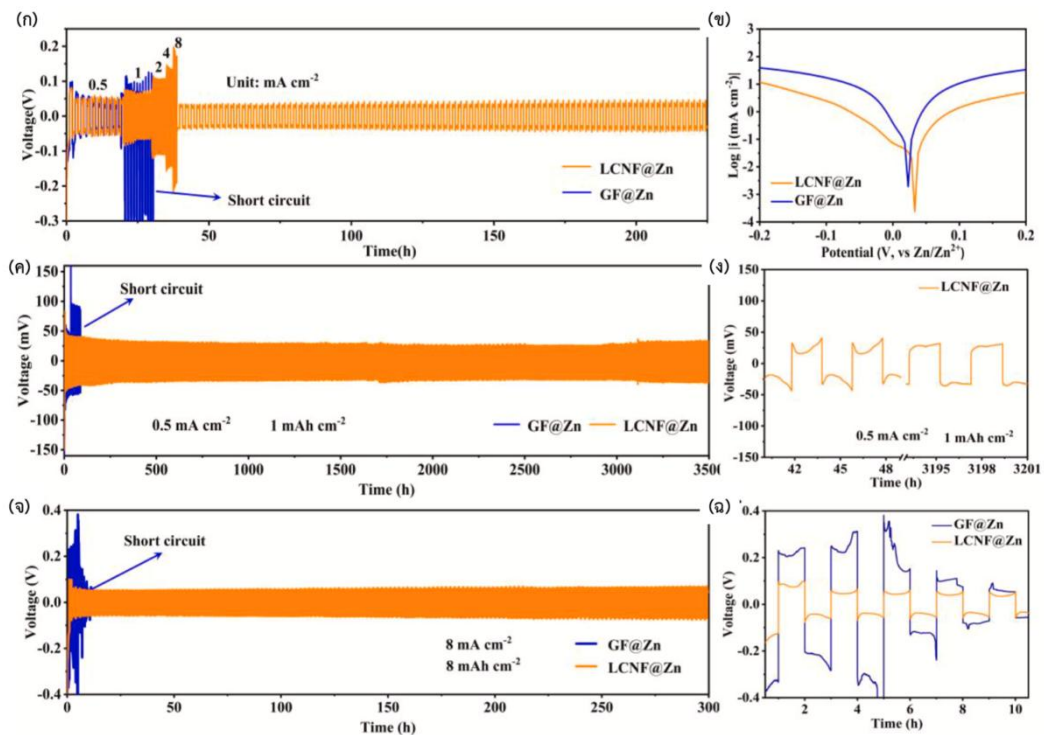
รูปที่ 8 แผนผังของกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนลิกโนเซลลูโลส [19]

ตัวคั่นดังกล่าวช่วยให้แบตเตอรี่สังกะสีไอออนมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น คือ มีค่าโพลาไรเซชันที่ต่ำเพียง 60.1 มิลลิโวลต์ และการคายประจุที่คงที่ในเซลล์สมมาตร (Zn||Zn) เป็นเวลาถึง 3,500 ชั่วโมง ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 มิลลิแอมป์ต่อเซนติเมตร ตามรูปที่ (9ค) การชุบ/ลอกสังกะสี ที่มีประสิทธิภาพ Coulombic 99 % ในเซลล์ไม่สมมาตร (Cu||Zn) เป็นเวลามากกว่า 250 รอบ ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ 280.1 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม ใน แบตเตอรี่ MgVO||Zn คงประสิทธิภาพอยู่ที่ 89.7 % เป็นเวลามากกว่า 2,000 รอบ ที่ความหนาแน่นกระแส 5 แอมป์ต่อกรัม นอกจากนี้ตัวคั่นจากเส้นใยนาโนลิกโนเซลลูโลส สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในดินตามธรรมชาติภายในเวลาสองสัปดาห์



รูปที่ 9 คุณสมบัติของเส้นใยนาโนลิกโนเซลลูโลส (LCNF) และใยแก้ว (GF) (ก) เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด, เส้นโค้งความเครียด-ความเครียดที่ขยายใหญ่ขึ้นของตัวคั้น GF และมุมสัมผัสของ LCNF และ GF (ข) การกระจายขนาดรูพรุน (ค) สเปกตรัมอิมพีแดนซ์ AC ของตัวคั้นที่แตกต่างกัน (ง) การถ่ายโอน สังกะสีไอออนของแบตเตอรี่สมมาตร (จ) การซึมผ่านขององค์ประกอบสังกะสี และ ซัลเฟอร์ (ฉ) เส้นโค้ง Arrhenius และการเปรียบเทียบพลังงานการกระตุ้นของการสะสม สังกะสีไอออนในแบตเตอรี่สมมาตร [19]

Xinyu Yin และคณะ [20] กล่าวว่าแบตเตอรี่สังกะสีไอออนเป็นที่ต้องการ เนื่องจากข้อได้เปรียบด้านความปลอดภัย ต้นทุนต่ำ และความหนาแน่นของพลังงานสูง [21-23] แต่การเจริญเติบโตของเดนไดรต์บนขั้วแอโนด ขัดขวางการพัฒนาตัวคั้น โดย Xinyu Yin และคณะ [20] ได้ทำการทบทวนสรุปการพัฒนาตัวคั้น และข้อกำหนดสำหรับตัวคั้นต่างๆ เดนไดรต์ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน [24, 25] สามารถสร้างความเสียหายต่อตัวคั้น ทำให้แบตเตอรี่เกิดการลัดวงจร [26] ขัดขวางการพัฒนาของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน [27] แต่การดัดแปลงตัวคั้นเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเดนไดรต์ [28] และรักษาความเสถียรของวัฏจักรแบตเตอรี่ [29, 30]



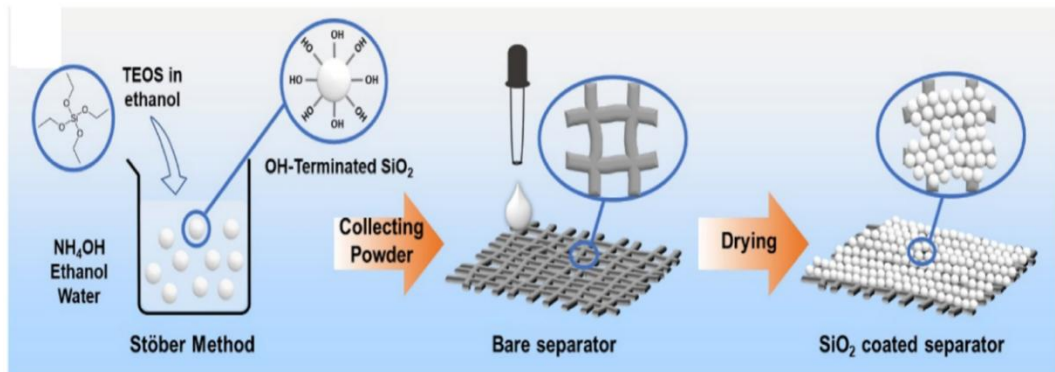
รูปที่ 10 การชาร์จ/ลอคสังกะสี (ก) แบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวที่แตกต่างกัน ที่ความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ ที่มีความจุ 0.5 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร (ข) พล็อต Tafel ของแบตเตอรี่สมมาตร (ค) การชาร์จ/ลอคสังกะสีแบบกัลวานอสแตติกในแบตเตอรี่สมมาตร ที่ 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ 0.5 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร (ง) โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้า-เวลาของรอบที่ 1 และรอบที่ 800 ที่ 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่มีความหนาแน่นของความจุ 1 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร (จ) การชาร์จ/ลอคสังกะสีแบบกัลวานอสแตติกในแบตเตอรี่สมมาตร ที่ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร กับ 8 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร และ (ฉ) โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้า-เวลาของรอบเริ่มต้นที่ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่มีความหนาแน่นความจุ 8 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร [19]

Yi Yang และคณะ [31] มีความคิดเห็นว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกใช้อย่างแพร่หลายแต่มีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย และค่าใช้จ่ายที่สูง ซึ่งนำไปสู่การวิจัยเกี่ยวกับแบตเตอรี่แบบชาร์จใหม่ได้ชนิดอื่นๆ อย่างเช่นแบตเตอรี่สังกะสีไอออนแบบน้ำ ที่มีแนวโน้มที่ดีเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มีปลอดภัย ไม่ไวต่ออากาศ และติดไฟได้อย่างอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน มีค่าความจุเชิงปริมาตรทางทฤษฎีสูง แต่ประสบปัญหาด้านความเสถียรของวัฏจักรที่ต่ำเนื่องจากการเจริญเติบโตของเดนไดรต์ และปฏิกิริยาข้างเคียง อย่างเช่นการกัดกร่อน (Corrosion) หรือปฏิกิริยาวิวัฒนาการไฮโดรเจน (Hydrogen evolution reaction)

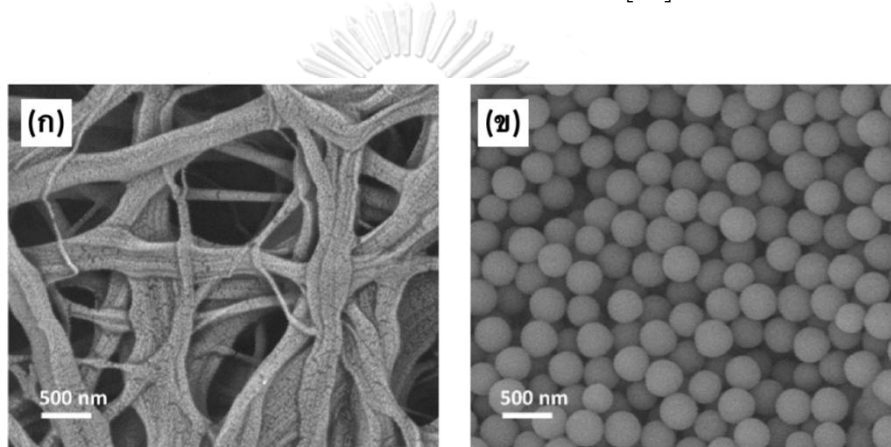
การเจริญเติบโตของเดนไดรต์ของสังกะสี เกิดจากฟลักซ์ของไอออนสังกะสีที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างกระบวนการชุบ/ลอก และถูกขับนำโดย เอฟเฟกต์ส่วนปลาย (Tip effect) ซึ่งสังกะสี จะสร้างนิเวศที่ยื่นออกมาซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูงกว่า และมักจะเกิดที่บริเวณเดิมทับถมกันไปเรื่อยๆ จนสามารถทะลุผ่านตัวคั่นแล้วไปชนกับขั้วแคโทดจนทำให้เกิดการลัดวงจร [31] ปฏิกริยาข้างเคียงทำให้ประสิทธิภาพวงจรแย่งลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกรดอ่อนๆ เช่น $ZnSO_4$ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาวิวัฒนาการของไฮโดรเจน (HER) นำไปสู่การก่อตัวของผลพลอยได้ (By product) เช่น $Zn_4SO_4(OH)_6H_2O$ โดยการควบรวมการโตของเดนไดรต์และปฏิกิริยาข้างเคียงต่างๆ สามารถลดประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน นำไปสู่การสลายตัวของความจุอย่างรวดเร็ว และทำให้แบตเตอรี่เสียหายในที่สุด [31]

Yi Yang และคณะ [31] จึงได้คิดค้นการปรับเปลี่ยนตัวคั่น เพื่อปรับขนาดช่องทาง เพื่อเป็นแนวทางให้การสะสมของสังกะสีไอออน มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และควบคุมกระบวนการชุบ/ลอกของสังกะสี ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของขั้วแอโนดสังกะสี และแบตเตอรี่ เพื่อขับนำฟลักซ์สังกะสีไอออน ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีการกระจายของรูพรุนที่สม่ำเสมอของตัวคั่น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ลักษณะทางกายภาพของตัวคั่น และหมู่ฟังก์ชัน สามารถดึงดูดไอออนของสังกะสี เพื่อสร้างฟลักซ์ไอออนของสังกะสี ที่สม่ำเสมอได้ อย่างไรก็ตาม ขอบเขตของประจุลบของกลุ่มฟังก์ชันอาจเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบส ซึ่งอาจลดความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออน การทำความเข้าใจเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสภาพแวดล้อม ค่าความเป็นกรด-เบส ที่มีความเสถียรของประจุลบของกลุ่มการทำงานเป็นสิ่งสำคัญในการตระหนักถึงวิธีแก้ปัญหาในทางปฏิบัติสำหรับการก่อตัวของเดนไดรต์สังกะสี และปฏิกิริยาข้างเคียง [31]

ซิลิกอนไดออกไซด์ (ซิลิกอนไดออกไซด์) นาโนสเฟียร์ที่เคลือบอยู่บนตัวคั่น สามารถควบคุมฟลักซ์ของสังกะสีไอออน และสร้างเครือข่ายที่สม่ำเสมอของช่องทางขนส่งสังกะสีไอออน ซึ่งช่วยให้เกิดการสะสมของสังกะสี อย่างสม่ำเสมอ และสามารถต้านทานการเติบโตของเดนไดรต์สังกะสีได้ โดยซิลิกอนไดออกไซด์นาโนสเฟียร์ถูกสังเคราะห์โดยใช้วิธี Stober ซึ่งเกี่ยวข้องกับสารเติมสาร Tetraethoxyorthosilane (TEOS) และ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ลงในเอทานอล และน้ำปราศจากไอออน (DI water) ตามลำดับ ตามด้วยการให้ความร้อน และการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง ดังรูปที่ 11 [31]

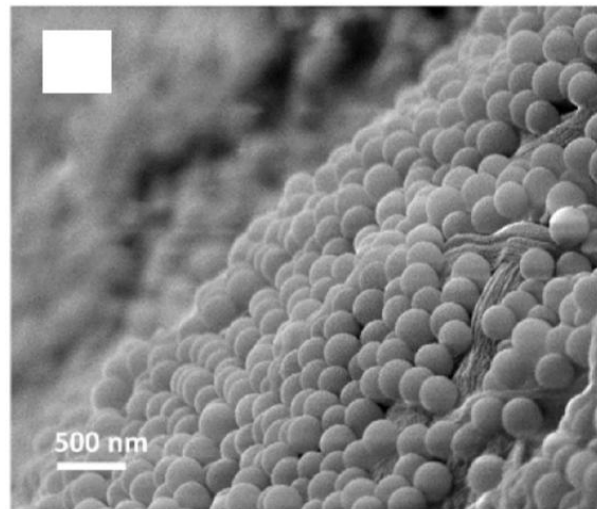


รูปที่ 11 ภาพประกอบแผนผังของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ นาโนสเฟียร์ และการเตรียมตัว
คั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ [31]



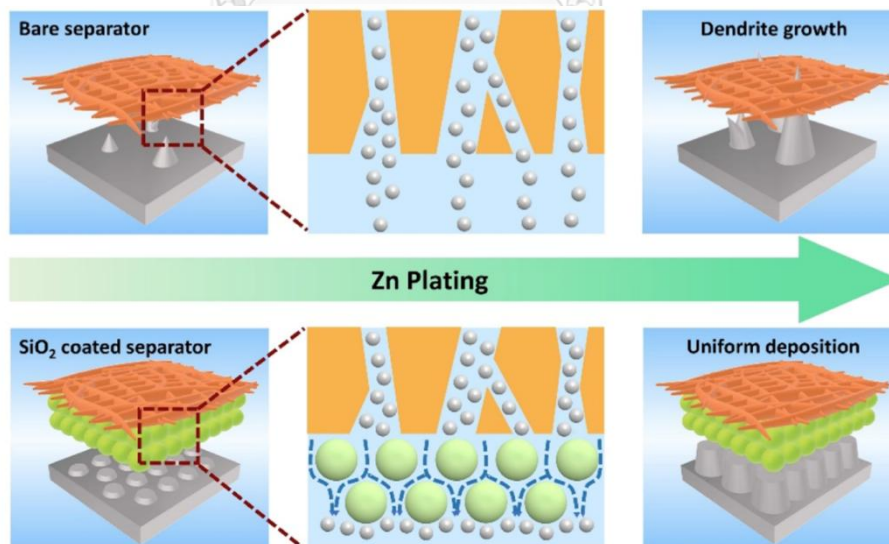
รูปที่ 12 (ก) ภาพ SEM ของตัวคั่นเปล่าจากมุมมองด้านบน (ข) ภาพ SEM ของตัวคั่นเคลือบ
ซิลิกอนไดออกไซด์จากมุมมองด้านบน [31]

นำผงซิลิกอนไดออกไซด์ผสมกับผงโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride, PVDF) โดยใช้ เอน-เมทิล-2-ไพโรลิโดน (N-Methyl-2-Pyrrolidone, NMP) เป็นตัวทำละลาย เพื่อเตรียมสารแขวนลอยที่เป็นเนื้อเดียวกันที่มีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัม ต่อ มิลลิตร จากนั้นนำมาเคลือบลงบนตัวคั่นทั้งสองด้าน และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ข้ามคั่นดังรูปที่ 11 [31]



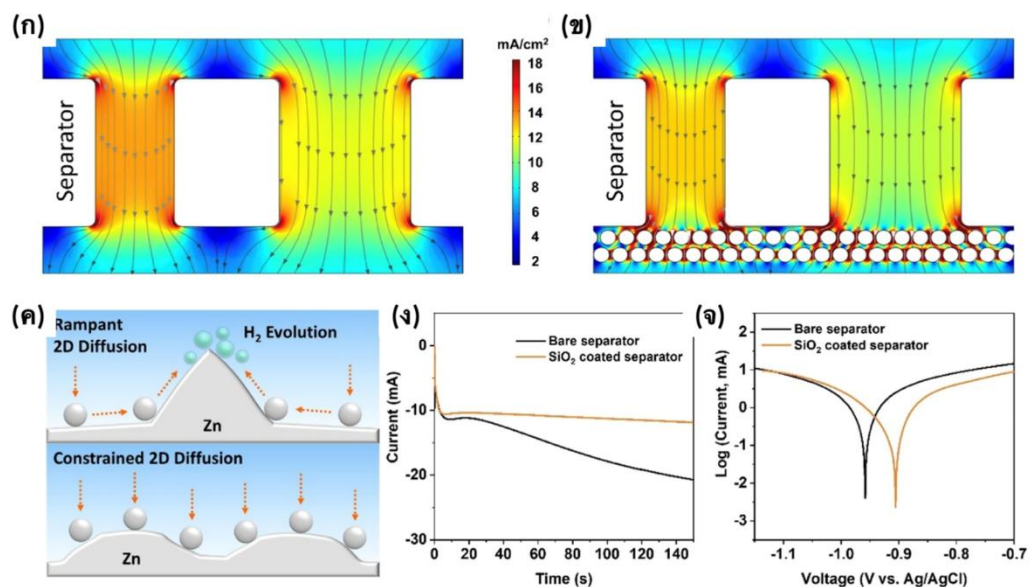
รูปที่ 13 ภาพ SEM ของตัวคั่นเคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ มุมมองภาพตัดขวาง [31]

อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 340 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดที่แคบ ทำให้มีประโยชน์สำหรับการสร้างช่องทางขนส่งไอออนสังกะสี การปรากฏตัวของกลุ่มไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้มีประจุลบ ซึ่งสามารถปรับฟลักซ์ไอออนสังกะสี ได้ โดยเครื่องแยกเซลล์โพลีเมอ มีการกระจายรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ และประจุบนพื้นผิวเพียงเล็กน้อย ทำให้ไม่มีประสิทธิภาพในการนำทางฟลักซ์ไอออนสังกะสีได้

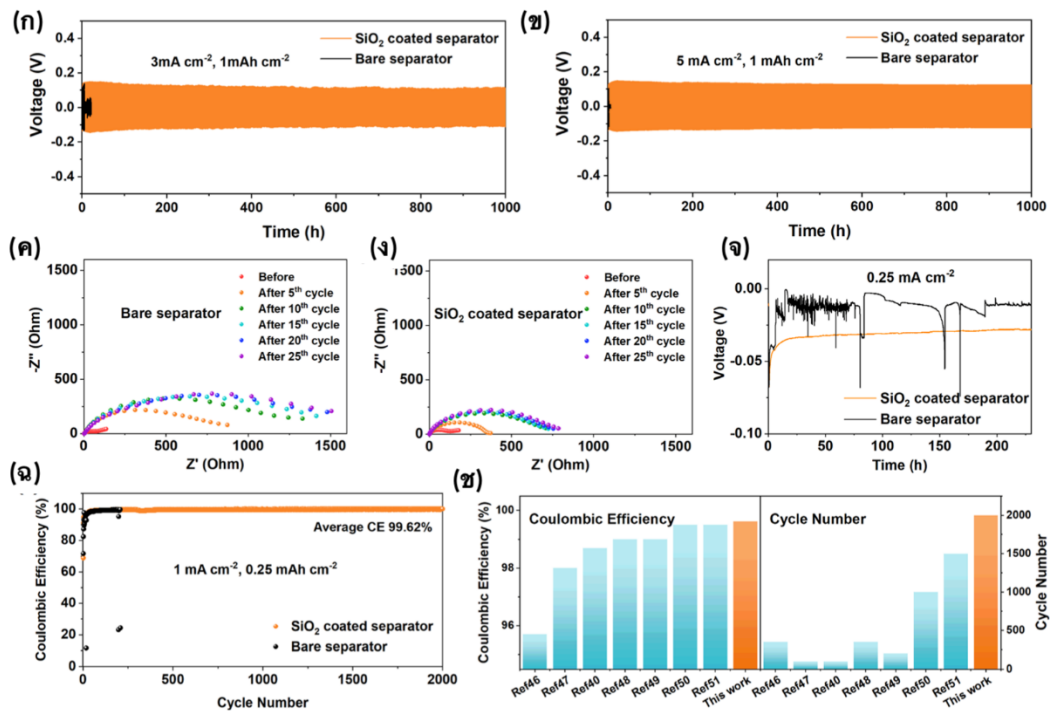


รูปที่ 14 แผนผังของกระบวนการชุบสังกะสี โดยใช้ตัวคั่นแบบเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าการกระจายกระแสของสังกะสีไอออนที่ไม่สม่ำเสมอในรูพรุนของตัวคั่นแบบเดิม ทำให้เกิดการก่อดวงของเดนไดรต์ระหว่างการสะสมของสังกะสี แต่การเคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนสเฟียร์ช่วยลดความไม่สม่ำเสมอ และปรับปรุงความสม่ำเสมอของการตกตะกอนของสังกะสี นอกจากนี้การเคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ยังจำกัดการแพร่กระจายแบบสองมิติของไอออนสังกะสี หลังจากเกิดนิวเคลียสครั้งแรก ส่งผลให้เกิดชั้นทับถมที่เรียบมากขึ้น ซึ่งช่วยลดปฏิกิริยาข้างเคียง ลดอัตราการกัดกร่อนที่บริเวณแอโนดสังกะสี และช่วยเพิ่มความเสถียรของวัฏจักรการชาร์จ/ลอคของสังกะสีแอโนด ในแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ [31]



รูปที่ 15 การจำลอง COMSOL แสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสผ่าน (ก) ตัวคั่นเปล่า (ข) ตัวคั่นที่เคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (ค) แผนผังไดอะแกรมของพฤติกรรมแพร่กระจายของสังกะสีไอออนบนแอโนดสังกะสีที่มีตัวคั่นเปล่า (ด้านบน) และตัวคั่นที่เคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (ด้านล่าง) (ง) เส้นโค้ง Chronoamperometry ของเซลล์สมมาตร (Zn||Zn) พร้อมตัวคั่นเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ และ (จ) เส้นโค้งโพลาริเซชันเชิงเส้นแสดงการกัดกร่อนของแอโนดสังกะสี ด้วยตัวคั่นแบบเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (ตัวคั่นถูกต่อเข้ากับขั้วแอโนดสังกะสีในการตั้งค่าอิเล็กโทรดสามตัว) [31]

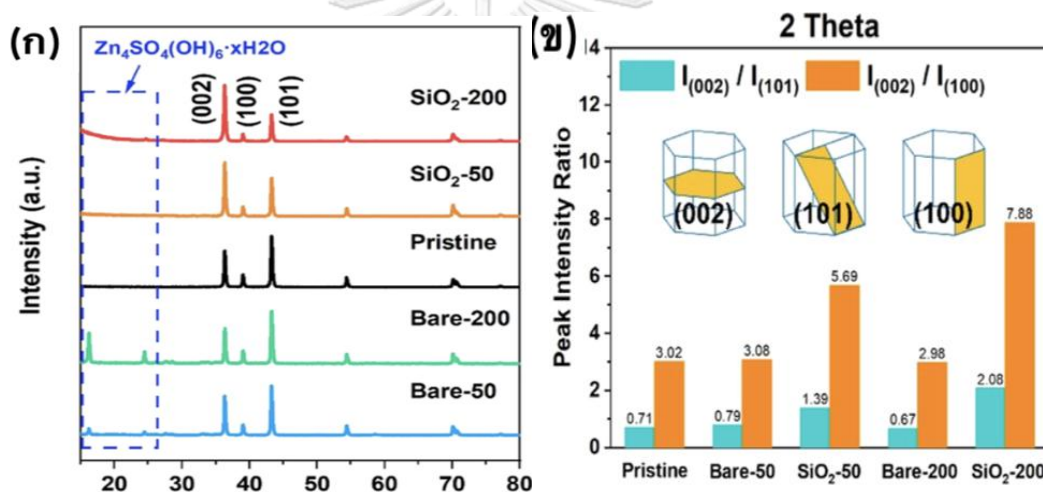


รูปที่ 16 ประสิทธิภาพวงจรของแบตเตอรี่สมมาตร (Zn||Zn) ที่มีตัวคั่นเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ความหนาแน่นกระแส และความจุของพื้นที่เท่ากับ (ก) 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 1 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร และ (ข) 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 1 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร เส้นโค้ง EIS ของแบตเตอรี่สมมาตร (Zn||Zn) ที่ 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 0.05 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร ด้วย (ค) ตัวคั่นเปลือย และ (ง) ตัวคั่นที่เคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (จ) เส้นโค้งโครโนโพเทนซีโอเมทรีแบตเตอรี่สมมาตร (Zn||Zn) ที่มีตัวคั่นเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ในการทดสอบการปลดปล่อยสังกะสี ที่ 0.25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ฉ) ประสิทธิภาพคูลอมบิกของแบตเตอรี่ (Zn||Cu) ที่มีตัวคั่นเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 0.25 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร (ช) ประสิทธิภาพเฉลี่ยของคูลอมบิก และวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ (Zn||Cu) ที่มีตัวคั่นที่เคลือบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับกลยุทธ์การป้องกันแอโนดสังกะสีที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ [31]

ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ 200 เท่า เมื่อเทียบกับตัวคั่นแบบเปลือย การเคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ช่วยให้การชุบ/ลอกสังกะสี มีความเสถียรมากขึ้น จึงส่งผลให้ขั้วแอโนดสังกะสีมีความเสถียรสูง ยังสามารถยับยั้งการเกิดเดนไดรต์สังกะสีในระหว่างกระบวนการชุบ/ลอกซ้ำๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย และทำให้มีส่วนต่อประสานที่เสถียรบนขั้วแอโนดสังกะสี เพื่อลดปฏิกิริยาข้างเคียง ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์แสดง

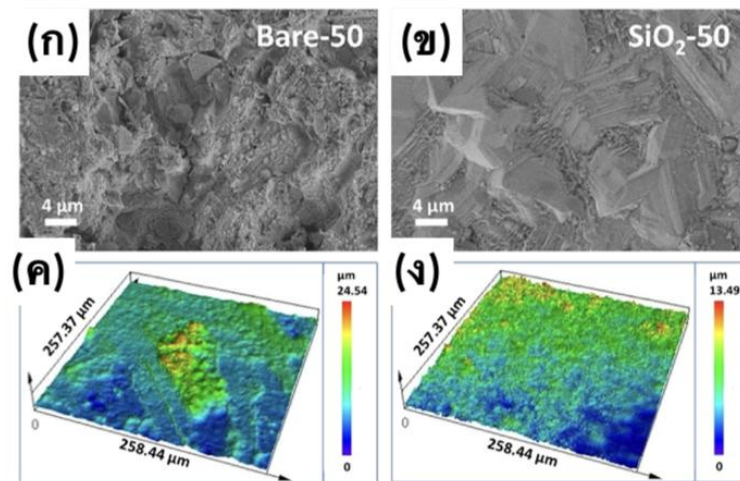
แรงดันไฟฟ้าที่เสถียรนานกว่า 220 ชั่วโมง ลดการก่อกำตัวของเดนไดรต์สังกะสี และสามารถเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้กับตัวคั่น ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สมมาตรยาวนานขึ้น [31]

จากรูปที่ 14(ฉ) แสดงประสิทธิภาพคูลอมบิก (Coulombic efficiency) ของแบตเตอรี่แบบอสมมาตร (Zn||Cu) ได้รับการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการย้อนกลับ ของกระบวนการชุบ/ลอกของสังกะสีพบว่าตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบ/ลอกของสังกะสี และเพิ่มความเสถียรของขั้วแอโนดสังกะสี ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าประสิทธิภาพคูลอมบิก (Coulombic efficiency) เฉลี่ยที่ประมาณ 99.62 % ในการใช้งานที่ 2,000 รอบ กลยุทธ์การเคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์บนตัวคั่น อาจมีประสิทธิภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพวงจรของแบตเตอรี่ ซึ่งเหนือกว่าแบตเตอรี่สมมาตรที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้จำนวนมากที่ได้แก้ไขโดยใช้กลยุทธ์ต่างๆ [31]

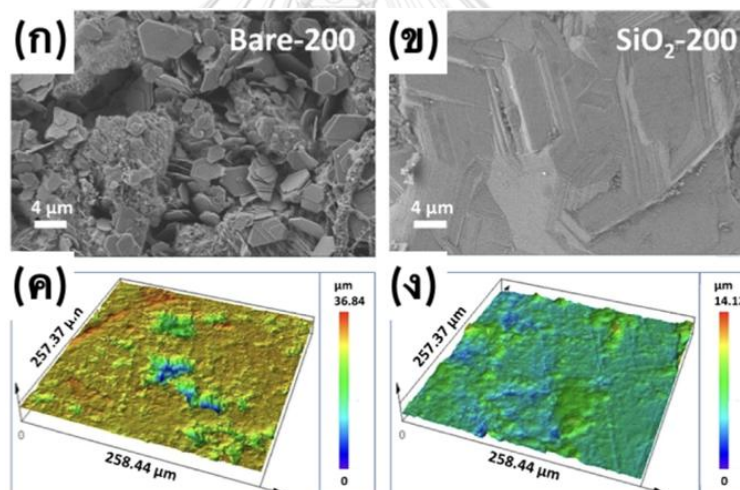


รูปที่ 17 (ก) รูปแบบ XRD ของแอโนด (ข) อัตราส่วนความเข้มสูงสุดของ XRD ของระนาบ (002) ต่อระนาบ (101) และ (100) [31]

ลักษณะหลังการวิเคราะห์สำหรับขั้วแอโนดสังกะสี หลังจากการใช้งานตามการกำหนดค่าของแบตเตอรี่แบบสมมาตร ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ช่วยให้การสะสมของสังกะสี ในระนาบ (002) สะดวกขึ้น ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างพื้นผิวสังกะสี ที่แบนราบ และสามารถลดการเกิดเดนไดรต์ได้ โดยแอโนดสังกะสี ที่ใช้ตัวคั่นเปล่าแสดงพิกเพิ่มเติม ซึ่งสอดคล้องกับผลพลอยได้ (By-product) ซึ่งก็คือ Zn₄SO₄(OH)₆·xH₂O ซึ่งแสดงในรูปที่ 17(ก) [31]



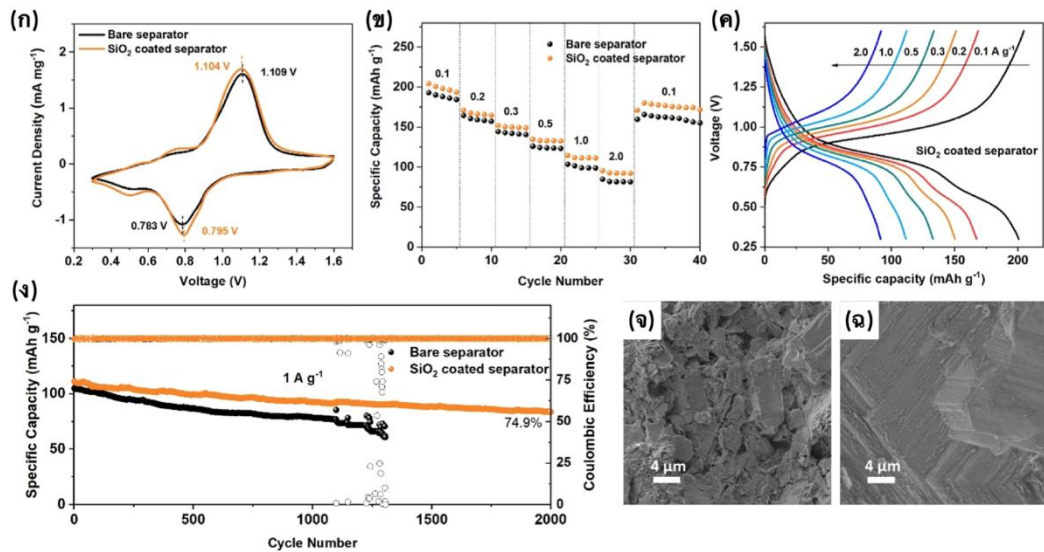
รูปที่ 18 ภาพ SEM ของแโนดสังกะสีหลังจากใช้งาน 50 รอบที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วย (ก) ตัวคั่นเปล่าและ (ข) ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ และภาพออปติก CLSM ที่สอดคล้องกันของ แโนดสังกะสีที่มี (ค) ตัวคั่นเปล่า และ (ง) ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์



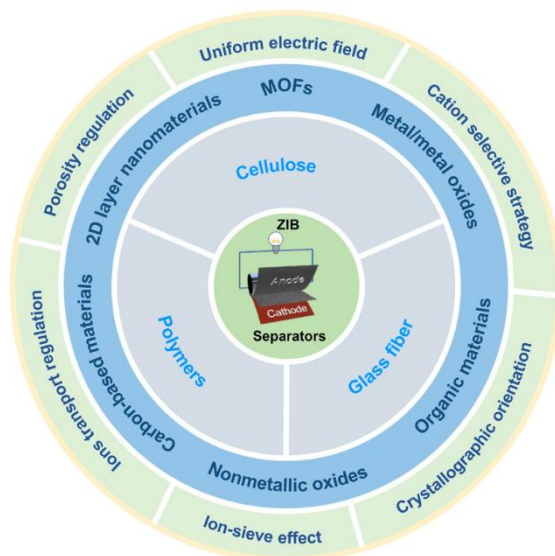
รูปที่ 19 ภาพ SEM ของแโนดสังกะสีหลังจากการใช้งานที่ 200 รอบ ที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 1 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร พร้อม (ก) ตัวคั่นเปล่า และ (ข) ตัวคั่นที่เคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ และภาพออปติก CLSM ที่สอดคล้องกันของ แโนดสังกะสีที่มี (ค) ตัวคั่นเปล่า และ (ง) ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ [31]

งานวิจัยนี้ใช้ SEM และ CLSM เพื่อสังเกตสัณฐานวิทยาของแอโนดสังกะสี ที่ใช้ตัวคั่นที่แตกต่างกัน โดยตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้ได้พื้นผิวที่เรียบขึ้น และมีผลึกสังกะสีที่เรียงซ้อนกันอย่างใกล้ชิดเป็นระเบียบ ในขณะที่ตัวคั่นแบบเปลือยทำให้เกิดการก่อตัวของเดนไดรต์ และพื้นผิวแอโนดสังกะสีที่ขรุขระมากกว่า ตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ควบคุมฟลักซ์ไอออนสังกะสี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มการชุบสังกะสี ที่สม่ำเสมอด้วยการสะสมพิเศษในระนาบ (002) ทำให้ได้พื้นผิวแอโนดสังกะสีที่เป็นระเบียบราบเรียบ พร้อมการระงับการก่อตัวของเดนไดรต์ระหว่างการหมุนเวียน แบตเตอรี่แบบฟูลเซลล์ (Full cell battery) ที่มีตัวคั่นแบบเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบด้วย ลิกอนไดออกไซด์ ถูกประกอบขึ้นเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ในการใช้งานจริง โดยตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ แสดงประสิทธิภาพอัตราที่ดีขึ้น และความเสถียรของวงจรที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวคั่นแบบเปลือย สามารถเพิ่มความสามารถในการไป และย้อนกลับของขั้วแอโนดสังกะสี และทำให้ได้แบตเตอรี่ที่มีความเสถียรของวงจรที่ดีขึ้น แอโนดสังกะสีที่มีตัวคั่นที่เคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ จะแสดงพื้นผิวที่หนาแน่น และมีการสะสมเป็นชั้นๆ ในขณะที่ตัวคั่นที่มีตัวคั่นเปลือยจะมีเกล็ดเติบโตในแนวตั้ง ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง [31]

โดยสรุปคือ มีการเสนอกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนตัวแยกโดยใช้ซิลิกอนไดออกไซด์นาโนสเฟียร์ที่เคลือบบนตัวคั่นเซลลูโลส เพื่อให้ฟลักซ์ไอออนของสังกะสี เป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้เกิดการสะสมของสังกะสี อย่างสม่ำเสมอ และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลที่ดีขึ้น กลยุทธ์นี้บรรลุความเสถียรของวัฏจักรที่มากกว่า 2,000 รอบ โดยมีค่าประสิทธิภาพคูลอมบิก เฉลี่ยที่ 99.62% สำหรับแบตเตอรี่อสมมาตร ซึ่งให้ข้อมูลเชิงลึกใหม่เกี่ยวกับการพัฒนาการปรับเปลี่ยนตัวคั่นเชิงพาณิชย์สำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอออน แบบชาร์จใหม่ได้ที่ใช้โลหะสังกะสี ที่มีประสิทธิภาพดี และมีต้นทุนต่ำ [31]

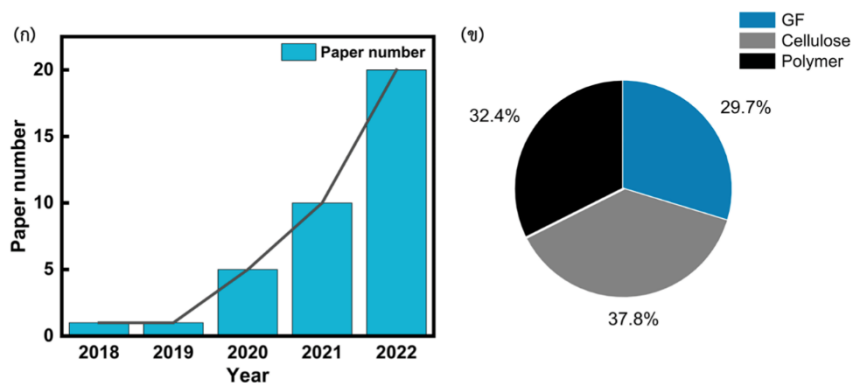


รูปที่ 20 (ก) เส้นโค้ง CV ของแบตเตอรี่ Zn||NVO ใน 1.0 M ZnSO₄ ผสม 1.0 M Na₂SO₄ พร้อมตัวคั่นเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที (ข) อัตราประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ Zn||NVO ที่มีตัวแยกเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ (ค) โพรไฟล์การอัด/คายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ Zn||NVO ที่มีตัวคั่นที่เคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ (ง) การแสดงวงจรของแบตเตอรี่ Zn||NVO ที่มีตัวแยกเปลือย และตัวคั่นที่เคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ 1.0 แอมป์ต่อกรัม ภาพ SEM ของพื้นผิวสังกะสีที่ใช้กับ (จ) ตัวคั่นแบบเปลือย และ (ฉ) ตัวคั่นที่เคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ [31]



รูปที่ 21 แผนผังของวัสดุสำหรับตัวคั่นของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน [20]

ความก้าวหน้าล่าสุดของการดัดแปลงตัวคั่นได้รับการทบทวนอย่างเป็นระบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 21 การวิจัยล่าสุดแสดงให้เห็นว่าการดัดแปลงตัวคั่นในแบตเตอรี่สังกะสีไอออน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเดนไดรต์ เพิ่มอายุการใช้งานขั้วแอโนด และรักษาความเสถียรของวงจรแบตเตอรี่ [25]



รูปที่ 22 (ก) เอกสารการวิจัยที่เผยแพร่เกี่ยวกับตัวคั่นแบตเตอรี่สังกะสีไอออน ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา ข้อมูลจากเอลส์เวียร์ B.V. และ Google scholar (ข) สัดส่วนของวัสดุตัวคั่นพื้นฐานต่างๆ ในงานวิจัย ข้อมูลจากเอลส์เวียร์ B.V. และ กูเกิลสกอาร์ (Google scholar) [20]

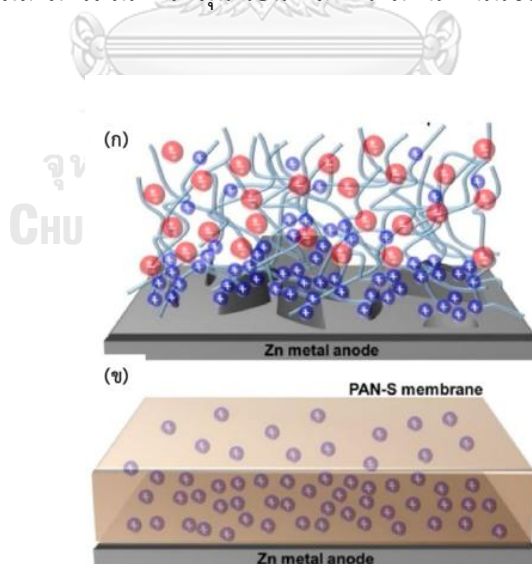
งานวิจัยบางฉบับเกี่ยวกับการดัดแปลงตัวคั่นแบตเตอรี่สังกะสีไอออน ในช่วง 2 ปีที่ผ่านมา จะเห็นว่าผลงานเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนตัวคั่นเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสังกะสีเดนไดรต์ เพิ่มอายุการใช้งานของสังกะสีแอโนด และรักษาความเสถียรของวงจรแบตเตอรี่ โดยตัวคั่นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของแบตเตอรี่ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างขั้วแคโทด และขั้วแอโนด นำอิเล็กโทรไลต์ไปใช้ [32] และให้เส้นทางการแพร่กระจายของไอออน [33] ตัวแยกแบตเตอรี่ควรมีลักษณะต่างๆ เช่น ต้นทุนต่ำ ความสม่ำเสมอของความหนา ความพรุน ความแข็งแรงเชิงกล คุณสมบัติทางเคมีที่เสถียร และความสามารถในการดูดซับน้ำที่โดดเด่น เพื่อป้องกันการลัดวงจร และการทำงานที่เสถียร เป็นเวลานานระหว่างปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซ้ำๆ [20]

กลยุทธ์ทางวิศวกรรมของตัวคั่นแบตเตอรี่สังกะสีไอออน มีวิธีการดัดแปลงเพื่อปรับปรุงการทำงานของวัสดุตัวคั่นพื้นฐาน 3 ชนิด ได้แก่ โยแก้วเชิงพาณิชย์ [11] เซลลูโลส [34] และโพลิเมอร์สังเคราะห์ [35] สำหรับใช้ในแบตเตอรี่สังกะสีไอออน [36] อย่างไรก็ตาม ตัวคั่นโยแก้ว มีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ และรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของโลหะสังกะสีระหว่างการชาร์จไฟ ตัวคั่นที่มีเซลลูโลสเป็นหลักมีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [37] แต่มีประสิทธิภาพการดูดซับ และกักเก็บอิเล็กโทรไลต์ต่ำ [38] ในขณะที่โพลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น โพลิโพรพิลีน หรือโพลิเอทิลีนไม่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอออน เนื่องจากคุณสมบัติที่ชอบน้ำต่ำ [39]

ตัวคั่นเชิงพาณิชย์มีคุณสมบัติที่ยากต่อการดัดแปลง แต่คุณสมบัติทางเคมี เช่น ความสามารถในการเปียกน้ำ การนำไฟฟ้าแบบไอออนิก และค่าสัมพรรคภาพของสังกะสีสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มกลุ่ม หรือสารประกอบอนินทรีย์สังกะสี นักวิจัยสามารถปรับเปลี่ยนสารประกอบภายในเส้นใยเซลลูโลส และการรวมหมู่ฟังก์ชันเข้ากับสายโซ่โพลีเมอร์ [20]

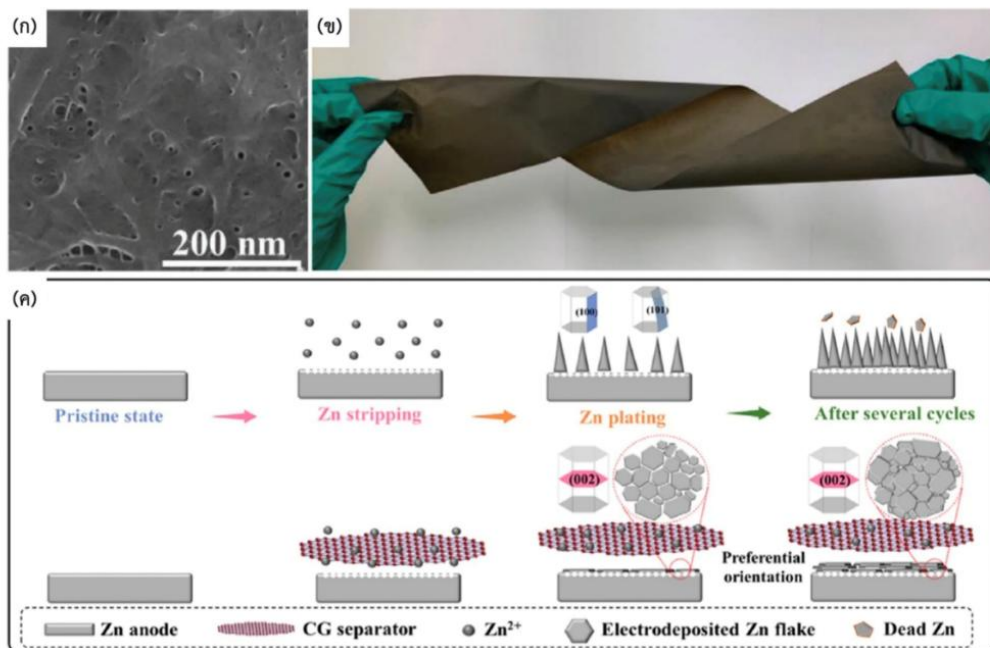
นักวิจัยต่างได้พัฒนาวัสดุต่างๆ สำหรับการดัดแปลงตัวคั่นในแบตเตอรี่สังกะสีไอออน รวมถึงการเติมออกไซด์ของโลหะ/ออกไซด์ของโลหะ วัสดุนาโนในเลเยอร์ 2 มิติ วัสดุที่มี MOF เป็นพื้นฐาน วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ และวัสดุอินทรีย์ วัสดุดัดแปลงสามารถมีหลายบทบาทขึ้นอยู่กับประเภทของตัวคั่น และวิธีการสังเคราะห์ กลไกของตัวคั่นแบบดัดแปลงส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การเคลื่อนที่ของไอออน และการกระจายสนามไฟฟ้า [20]

สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ และความหนาแน่นของกระแสเฉพาะที่ มีความสำคัญต่อการสะสมสังกะสีอย่างราบรื่นบนพื้นผิวขั้วแอโนด [40] และวัสดุนำไฟฟ้าที่ยึดในโครงสร้าง 3 มิติของตัวคั่นสามารถอำนวยความสะดวกในการเกิดนิวเคลียสของสังกะสีที่พื้นผิวอย่างสม่ำเสมอ [41] วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสามารถรักษาสนามไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวให้สม่ำเสมอระหว่างการสะสมของสังกะสี ตัวคั่น ZPSAM แสดงในรูปที่ 13 (ก,ข) และสังกะสี-นาฟิออน (Zn-Nafion) ถูกเสนอให้แทนที่โปรตอนด้วยไอออน สังกะสีไอออนส่งผลให้ตัวนำไอออนเดี่ยว และสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอตามลำดับ ตัวแยกเหล่านี้แสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในแบตเตอรี่สมมาตร โดยมีโพลาริเซชันที่ต่ำกว่า อายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ความสามารถในการหมุนเวียน และความหนาแน่นของพลังงานที่ดีขึ้น [42, 43]



รูปที่ 23 ภาพประกอบกราฟิกของ (ก) การเติบโตของเดนไดรต์แบบรุนแรงด้วยตัวคั่นธรรมดา และ (ข) การยับยั้งการเติบโตของเดนไดรต์ด้วยตัวคั่น PAN-S [44]

กลยุทธ์การดัดแปลงของตัวคั่นโดยการเคลือบพื้นผิวบนตัวคั่น การเคลือบพื้นผิวเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับส่วนต่อประสาน ดังที่แสดงโดย Sun และคณะ ซึ่งขยายกราฟีนแนวตั้งลงบนด้านหนึ่งของตัวคั่นใยแก้ว ดังรูปที่ 13(ก) โดยการใช้การเคลือบผิวด้วยพลาสมาเคมี (Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) และการบำบัดด้วยพลาสมาอากาศ ส่งผลให้โครงสร้าง Janus มีความสามารถในการดักจับสังกะสีที่เพิ่มขึ้น และอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่ดีขึ้น [45]



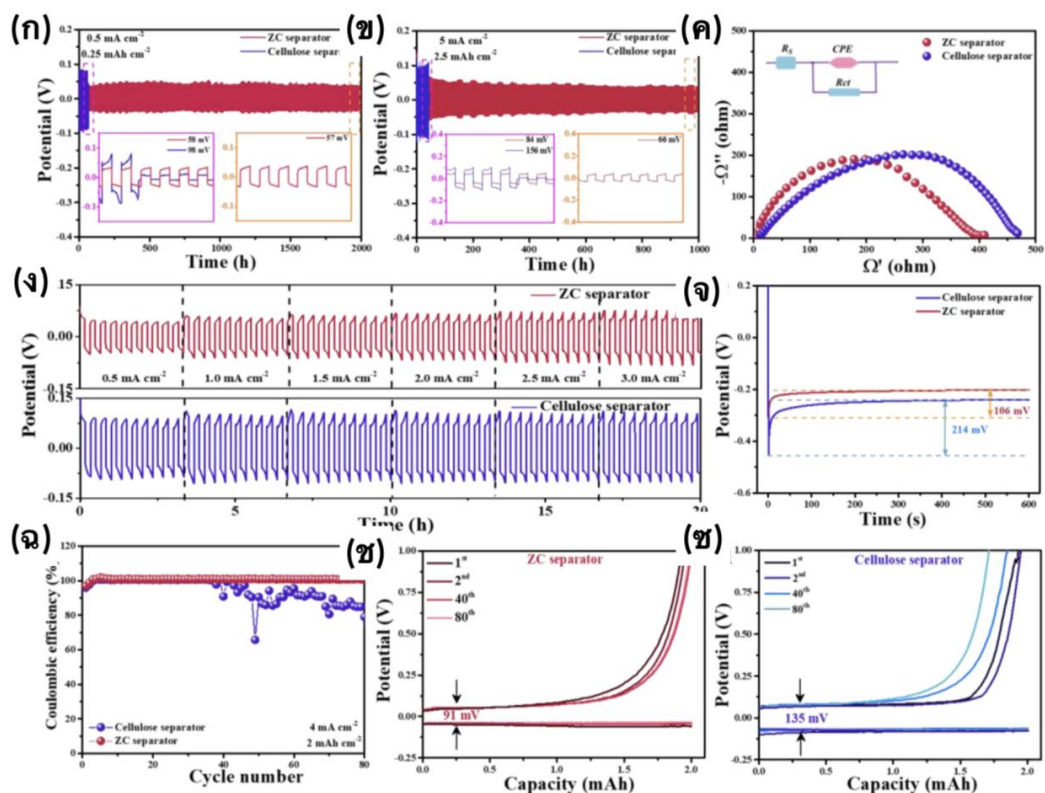
รูปที่ 24 (ก) ภาพ SEM และ (ข) รูปถ่ายตัวแยก CG (ค) ภาพประกอบแบบกราฟิกของตัวแยก CG ในการทำให้พฤติกรรมการชุบ/ลอกสังกะสีมีความเสถียร [46]



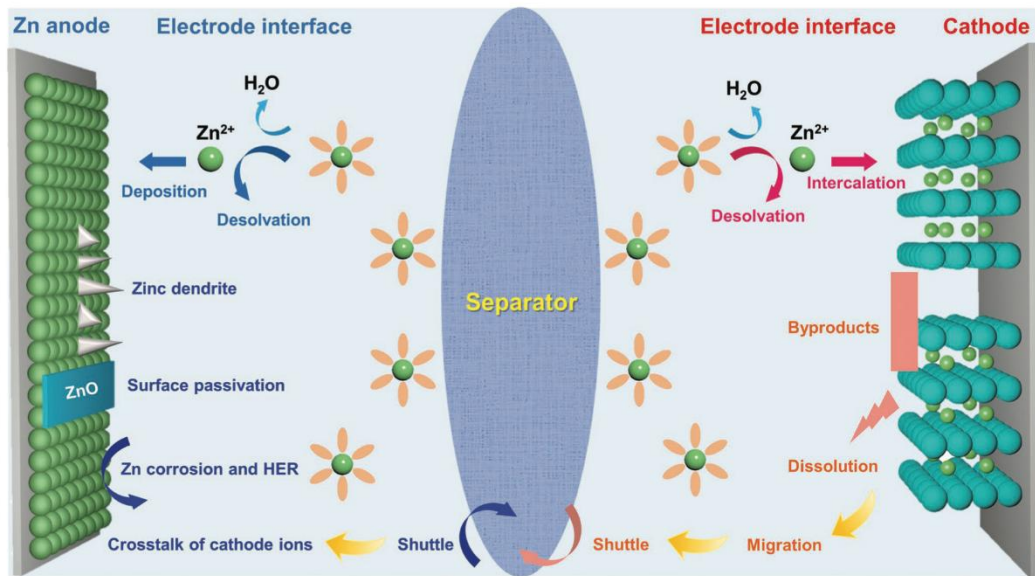
รูปที่ 25 กระบวนการผลิตตัวคั่น [34]

อนุภาคนาโนเซอร์โคเรเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ร่วมกับโพลีเมทิลเซลลูโลสสามารถสร้างตัวคั่นเซอร์โคเรเนียมไดออกไซด์/เซลลูโลสแบบไฮบริด ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง และความเสถียรทางเคมีไฟฟ้าที่ดี ส่งผลให้มีการถ่ายโอนไอออนสังกะสีไอออนจำนวนมาก และพฤติกรรมการชุบ/ลอก

สังกะสีที่เสถียรในแบตเตอรี่สังกะสีไอออน อนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ในตัวคั่นแบบไฮบริดที่มีโพลีเมทิลเซลลูโลสให้วิธีทางที่เป็นเนื้อเดียวกันสำหรับไอออน สังกะสีไอออนสามารถเร่งจลนพลศาสตร์ของการขนส่ง และทำให้พฤติกรรมการซบ/ลอกสังกะสีมีความเสถียร ส่งผลให้มีการถ่ายโอนไอออน สังกะสีไอออนจำนวนมาก และอายุการใช้งาน 2,000 ชั่วโมงที่ 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับแบตเตอรี่สมมาตร นอกจากนี้ตัวแยกคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถขยายไปยังเซรามิกที่เป็นฉนวนอื่นๆ ได้อีกด้วย [34]

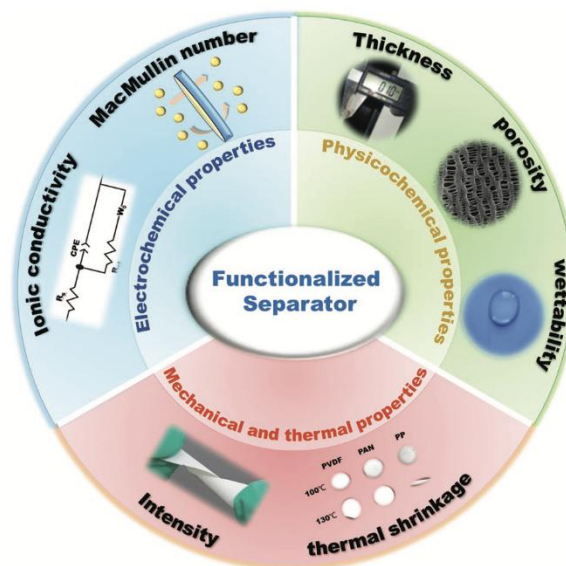


รูปที่ 26 โพรไฟล์ศักย์-เวลาของแบตเตอรี่สังกะสีสมมาตรที่มีตัวคั่น ZC และเซลลูโลส ภายใต้ (ก) 0.5 mA cm² และ (ข) 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ค) ผลลัพธ์ EIS (ง) อัตราประสิทธิภาพ (จ) NOP ของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตรพร้อมตัวแยก ZC และเซลลูโลส (ฉ) CE ของแบตเตอรี่ Zn||Ti พร้อมตัวแยก ZC และเซลลูโลส โพรไฟล์การปล่อยประจุที่เป็นไปได้ของแบตเตอรี่ (ช) Zn||ZC||Ti และ (ซ) Zn||เซลลูโลส||Ti ต่ำกว่า 4 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่มีความจุ 2 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร [34]



รูปที่ 27 ภาพประกอบแผนผังของปัจจัยผลกระทบของทั้งแอโนด และแคโทดในแบตเตอรี่สังกะสี ไอออนต่อการเชื่อมประสิทธิภาพ [47]

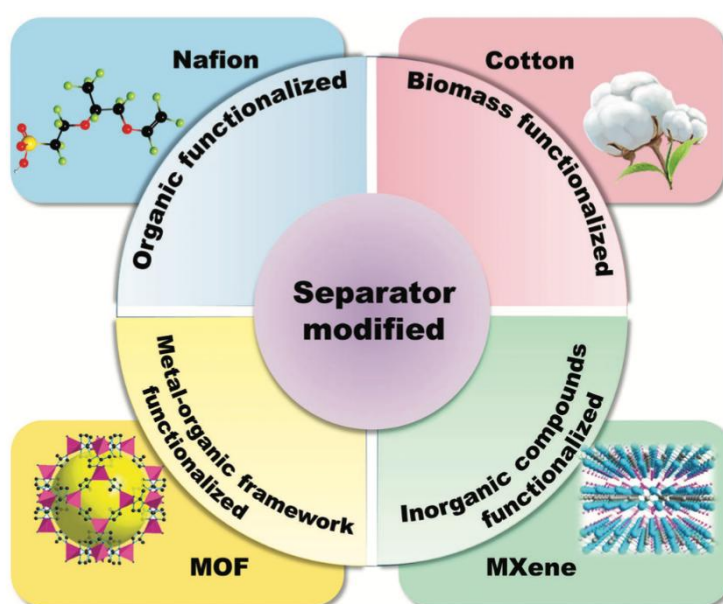
คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของตัวคั่น ประกอบด้วย ความหนา ความพรุน ขนาดรูพรุน ความสามารถในการเปียกน้ำ การดูดซับอิเล็กโทรไลต์ และความเสถียรทางเคมี ควรมีความบาง และสม่ำเสมอที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในขณะที่เป็นไปตามข้อกำหนดทางกล ขนาดรูพรุนควรมีขนาดเล็ก และมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมของอนุภาคสังกะสี และป้องกันการปลดปล่อยตัวเอง และตัวคั่นควรมีความสามารถในการเปียกน้ำได้ดี และมีความเสถียรทางเคมีในระยะยาว [47]



รูปที่ 28 แผนผังของความต้องการคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับตัวคั่น [47]

คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางความร้อนของตัวคั่น มีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพความปลอดภัยของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทำงานที่รุนแรง การดัดแปลง หรือการประกอบขึ้นส่วนตัวคั่นแบบเดิมสามารถเพิ่มความแข็งแรงทางกล และป้องกันการลัดวงจรที่เกิดจากการเจริญเติบโตของเดนไดรต์สังกะสี [47]

การเลือกใช้วัสดุสำหรับการเตรียมตัวแยกมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของตัวแยกที่ทำหน้าที่ในแบตเตอรี่ และการวิจัยที่กำลังดำเนินอยู่นั้นมุ่งเน้นไปที่การใช้วัสดุที่เป็นนวัตกรรมใหม่ เช่น MXenes, ออกไซด์ และไนไตรด์ โดยคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 29 แผนผังของตัวแยกการทำงานและวัสดุสำหรับการดัดแปลง [47]

อย่างไรก็ตาม ไอออนที่ละลายจากวัสดุแคโทดสามารถคุกคามความเสถียรของแอโนดสังกะสีได้ และในขณะที่การปรับปรุงความเสถียรทางโครงสร้างของวัสดุแคโทด และการออกแบบอิเล็กโทรไลต์เป็นวิธีแก้ปัญหาทั่วไป ตัวคั่นแบบใช้งานได้ได้รับความสนใจในฐานะวิธีแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนที่ละลาย และปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน [47]

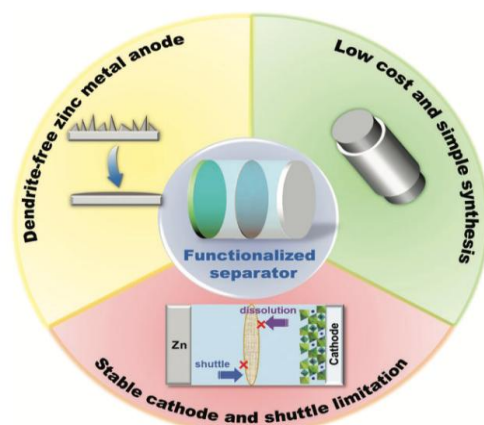
คุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของตัวคั่น การนำไฟฟ้าไอออนของแบตเตอรี่ส่งผลต่อพลังงาน ความจุ เกี่ยวข้องกับความพรุน และความคดเคี้ยวของตัวคั่น ตัวคั่นสามารถมีการทำงานที่มีค่าการนำไฟฟ้าไอออนสูงได้ โดยการควบคุมพื้นผิว และโครงสร้างของตัวคั่น ซึ่งสามารถปรับปรุงการเคลื่อนที่ของไอออน และลดการไล่ระดับความเข้มข้น โครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กของตัวคั่นสามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ N_m ซึ่งเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้าที่เป็นไอออน และสามารถใช้ในการทำนายการเจริญเติบโตของเดนไดรต์ได้อีกด้วย นักวิจัยได้พัฒนาตัวคั่นสองชั้นเพื่อป้องกันการละลายของแคโทด

ในแบตเตอรี่สังกะสีไอออน ตัวคั่นได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อยับยั้งการเคลื่อนตัวของไอออนที่ละลายน้ำ และป้องกันปฏิกิริยาข้างเคียง ตัวคั่นหน้าที่ยึดหยุ่น และหนาแน่นซึ่งตัดแปลงด้วยซีโอไลต์ได้รับการแสดงเพื่อบรรเทาปฏิกิริยาข้างเคียงอย่างมีนัยสำคัญ และเพิ่มประสิทธิภาพของคูอมบ์ [47]

ตัวคั่นสำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอออน ต้องการการออกแบบวัสดุ โครงสร้าง และส่วนประกอบอย่างมีเหตุผล เพื่อให้ไอออนพลาซมเป็นเนื้อเดียวกัน ป้องกันเดนไดรต์สังกะสี ยับยั้งการละลายของแคโทด และการปิดตัวของไอออน ขณะเดียวกันก็รักษาความแข็งแรงเชิงกลสูง และความเสถียรทางความร้อนภายใต้การเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกที่อ่อนแอ สภาวะกรด-ด่าง และมีขั้นตอนการผลิตในราคาถูกลง ด้วยกระบวนการเตรียมที่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในส่วนนี้

การพัฒนาแอโนดสังกะสีที่ปราศจากเดนไดรต์ และตัวคั่นที่ปราศจากเดนไดรต์ มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอออน ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยสามารถใช้เทคนิคทางกายภาพ และเคมีเพื่อป้องกันการเกิดเดนไดรต์ของสังกะสี และปรับปรุงการเคลื่อนย้ายไอออน และเทคนิคการระบุลักษณะเฉพาะขั้นสูงสามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาตัวคั่น [47]

การพัฒนาตัวแยกการทำงานที่มีกลุ่มการทำงานที่มีขั้วสามารถป้องกันการสลายตัวของแคโทด และไอออน ซึ่งช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน วัสดุแคโทดที่แตกต่างกันต้องการกลยุทธ์ที่แตกต่างกัน เช่น การแนะนำ Mn^{2+} หรือการใช้วัสดุที่มีโครงสร้างแบบเฟรมเวิร์กเปิด ตัวคั่นตามหน้าที่สามารถป้องกันการก่อตัวของเดนไดรต์ และลดการสลายตัวของแคโทดในแบตเตอรี่สังกะสีไอออน แต่กระบวนการสังเคราะห์ที่ซับซ้อน และมีราคาแพงขัดขวางการผลิตขนาดใหญ่ นักวิจัยจำเป็นต้องสำรวจวัสดุ และเทคนิคการผลิตที่คุ้มค่ามากขึ้น ตัวคั่นที่มีฟังก์ชันสำหรับแบตเตอรี่สังกะสีไอออน มีบทบาทสองอย่างในการยับยั้งการก่อตัวของเดนไดรต์ แต่ต้นทุนสูงและกระบวนการสังเคราะห์ที่ซับซ้อนขัดขวางการผลิตขนาดใหญ่ นักวิจัยควรสำรวจการใช้วัสดุที่มีอยู่มากมายและราคาไม่แพงและเทคนิคการผลิตที่คล่องตัว [47]



รูปที่ 30 แผนผังของภาพรวมสำหรับตัวคั่น [47]

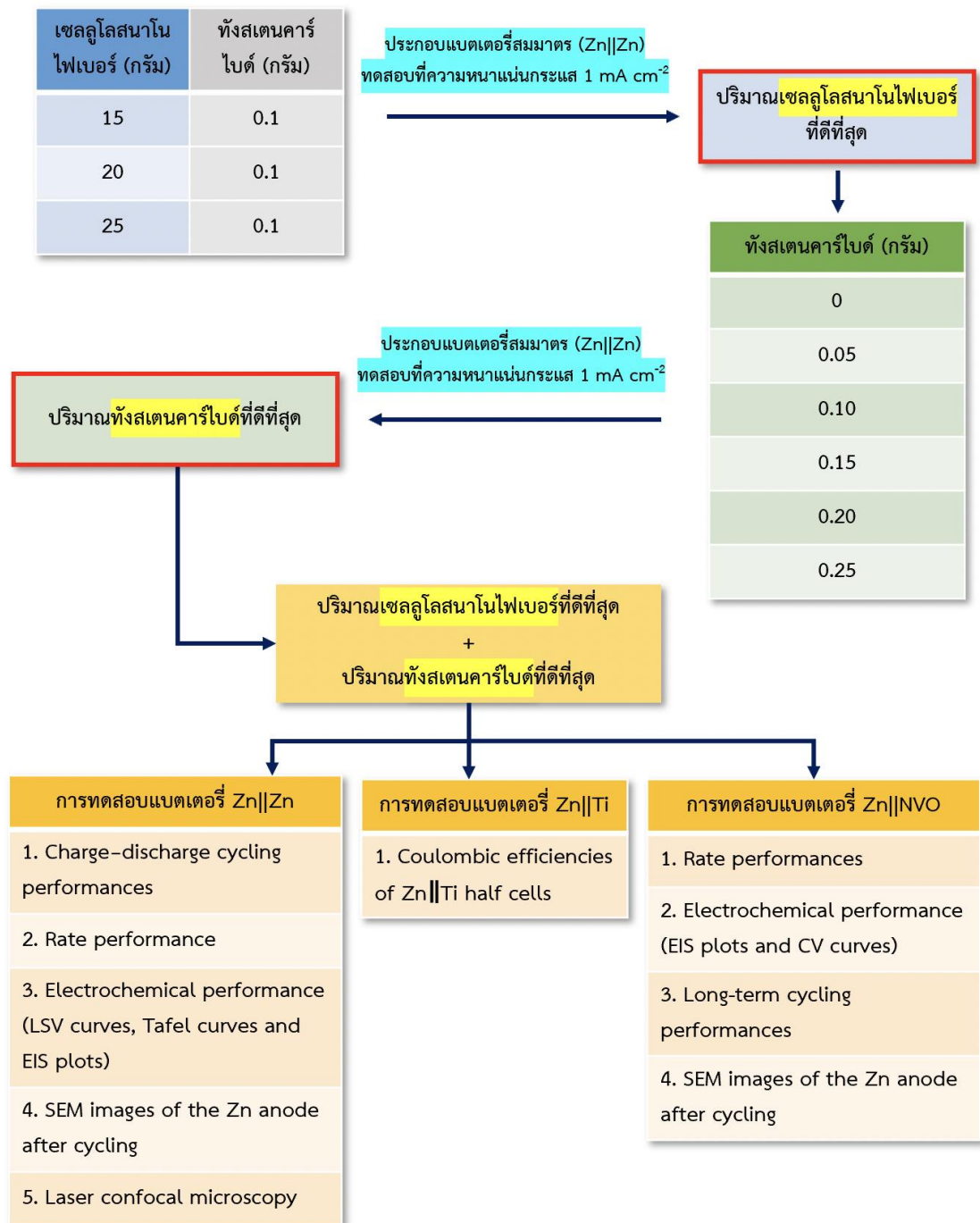
โดยจะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เป็นแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ไม่เหมาะสำหรับการจัดเก็บพลังงานขนาดใหญ่ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง และอิเล็กทรอนิกส์สามารถติดไฟได้ แบตเตอรี่สังกะสีไอออนเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากความปลอดภัย ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [48, 49] แต่ปัญหาที่สำคัญอย่างเรื่องการเกิดเดนไดรต์ เป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา แบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน และจากงานวิจัยของ Jin Cao และคณะ [17] ที่ได้มีการคิดค้นลูกผสมต่างชนิดกันของทั้งสแตนออกไซด์/คาร์ไบด์ เพื่อพัฒนาขั้วสังกะสีแอโนด ที่ปราศจากเดนไดรต์ เนื่องจากคุณสมบัติของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ช่วยทำให้เกิดการถ่ายเทประจุที่ดีขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุสูงขึ้น และศักยภาพการเกิดนิวเคลียสที่ต่ำลง ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการย้อนกลับสูง และความเสถียรมากขึ้น โดยประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดนิวเคลียสที่สม่ำเสมอ

มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

เนื่องจากงานวิจัยทั้งหมดข้างต้นที่ได้กล่าวมา โดยเฉพาะงานวิจัยของ Jin Cao และคณะ ที่ได้คิดค้นตัวคั่นเซลลูโลส-เซรามิก ที่สามารถป้องกันการเกิดเดนไดรต์ โดยในงานวิจัยนี้ยังบอกว่าจะสามารถประยุกต์ใช้ โดยการเปลี่ยนเป็นเซรามิกชนิดอื่นๆได้อีกด้วย [34] จึงเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยนี้ โดยเลือกทดลองเติมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ซึ่งก็เป็นอนุภาคเซรามิกเช่นเดียวกัน ลงในเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNF) โดยทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีคุณสมบัติสามารถเป็นตัวนำที่ดี, ลดค่าความต่างศักย์เกิน, สามารถเหนี่ยวนำให้กระแสไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่มีความเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น, มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงที่ดี, สามารถทนอุณหภูมิได้สูง, มีความเสถียรมาก, ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [50, 51] เพื่อพัฒนาเป็นตัวคั่นที่สามารถป้องกันการเกิดเดนไดรต์ ยืดอายุการใช้งาน และเพิ่มประสิทธิภาพด้านต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้อธิบายถึงรายละเอียดของสารเคมี เครื่องมือต่างๆ แผนการทดลองตั้งแต่แรกเริ่ม จนถึงขั้นตอนสุดท้าย รวมไปถึงวิธีที่ใช้ทดสอบแบตเตอรี่ทั้งหมด โดยรายละเอียดในกระบวนการต่างๆ สามารถสรุปภาพรวมวิธีการทดลองเป็นแผนภาพดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 แผนภาพการทดลอง

3.1 การเตรียมส่วนประกอบแบตเตอรี่

3.1.1 สารเคมี, วัสดุ, อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบที่ใช้ในการทดลอง

ตาราง 1 สารเคมี และวัสดุ

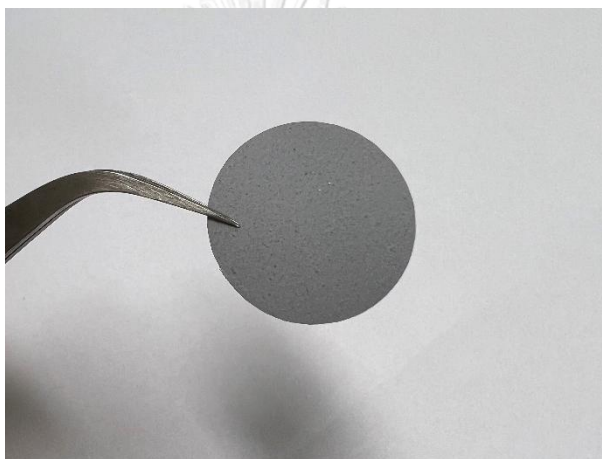
ชื่อสารเคมี/วัสดุ	สูตรเคมี	ใช้เป็นส่วนประกอบของ
Cellulose nanofibers (CNF)		ตัวคั่น
Tungsten carbide powder	WC	ตัวคั่น
Deionized water	H ₂ O	ตัวคั่น, อิเล็กโทรไลต์ และ แคโทด
Zinc sulfate	ZnSO ₄	อิเล็กโทรไลต์
Ammonium metavanadate	NH ₄ VO ₃	แคโทด
Thiourea	NH ₂ CSNH ₂	แคโทด
Sulfuric acid	H ₂ SO ₄	แคโทด
Ethanol	C ₂ H ₆ O	แคโทด
Graphite paper	C	แคโทด
Poly-vinylidene fluoride (PVDF)	-(C ₂ H ₂ F ₂) _n -	แคโทด
N,N-Dimethylformamide (DMF)	(CH ₃) ₂ NOCH	แคโทด
Conductive carbon	C	แคโทด
Zn foil (thickness: 0.1 mm)	Zn	แอโนด

ตาราง 2 เครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบ	บริษัทผู้ผลิต และรุ่นเครื่องทดสอบ
BTS battery tester	Neware, China
Scanning electron microscopy (SEM)	Hitachi S4800
Potentiostat	CHI 660E (Chenhua, China)
X-ray Diffractometer (XRD)	BRUKER D8 DISCOVER

3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวคั่น CNFs/WC

- เตรียมเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (Cellulose nanofibers) และน้ำปราศจากไอออน (DI water) ลงในบีกเกอร์ ปริมาณ 15, 20 และ 25 กรัม เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด
- จากนั้นเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) ตามปริมาณที่ต้องการ คือ 0.025, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 กรัม เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นผสมให้เข้ากันโดยใช้ Hotplate stirrer ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เทส่วนผสมที่เข้ากันดีแล้วลงในจานเพาะเชื้อแก้ว และทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- ตัดเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร โดยเครื่องตัดตัวคั่น



รูปที่ 32 ตัวคั่นชนิด CNFs/WC

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์)

- ตวงน้ำปราศจากไอออน (DI water) 42.492 มิลลิลิตร (ในกรณีที่ต้องการเตรียม สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร) ลงในบีกเกอร์
- จากนั้นเติมสังกะสีซัลเฟต 57.508 กรัม (ในกรณีที่ต้องการเตรียม สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร) แล้วผสมให้เข้ากันโดยใช้ เครื่องกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที หรือจนกว่าสารละลาย จะละลายเข้ากันเป็นเนื้อเดียว
- บรรจุใส่ภาชนะที่สะอาด และมีฝาปิดมิดชิด

3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมแคโทด NVO_D [52]

- แอมโมเนียเมตะวานาเดต (Ammonium metavanadate) 0.47 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
- ผสมไทโอยูเรีย (Thiourea) 3 มิลลิโมล ผสมในเข้ากันโดยใช้ เครื่องกวนสารละลาย เป็นเวลา 30 นาที

- ปรับค่ากรด-เบสโดยใช้กรดซัลฟิวริก ให้มีค่า pH เท่ากับ 2
- เพิ่มความร้อนให้ส่วนผสม มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และคนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที จะได้ส่วนผสมที่มีสีเขียวเข้ม
- ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.2 การประกอบแบตเตอรี่

3.2.1 การประกอบแบตเตอรี่สมมาตร Zn || Zn

- Negative electrode case (CR2032) หายขึ้น
- วาง Spring ลงใน Negative electrode case
- ตามด้วย Spacer
- ตามด้วยฟอยล์สังกะสี
- หยดอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์) ปริมาณ 75 ไมโครลิตร
- จากนั้นตามด้วยตัวคั่น
- หยดอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์) ปริมาณ 75 ไมโครลิตร อีกครั้ง
- วางทับด้วยฟอยล์สังกะสี
- ปิดด้วย Positive electrode case
- แล้วอัดประกอบ โดยใช้เครื่องอัดแบตเตอรี่

3.2.2 การประกอบแบตเตอรี่สมมาตร Zn || Ti

- Negative electrode case (CR2032) หายขึ้น
- วาง Spring ลงใน Negative electrode case
- ตามด้วย Spacer
- ตามด้วยฟอยล์สังกะสี
- หยดอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์) ปริมาณ 75 ไมโครลิตร
- จากนั้นตามด้วยตัวคั่น
- หยดอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์) ปริมาณ 75 ไมโครลิตร อีกครั้ง
- วางทับด้วยฟอยล์ไทเทเนียม
- ปิดด้วย Positive electrode case
- แล้วอัดประกอบ โดยใช้เครื่องอัดแบตเตอรี่

3.2.3 การประกอบแบตเตอรี่ Zn || NVO_D

- Negative electrode case (CR2032) หายขึ้น
- วาง Spring ลงใน Negative electrode case

- ตามด้วย Spacer
- ตามด้วยฟอยล์สังกะสี
- หยดอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์) ปริมาณ 75 ไมโครลิตร
- จากนั้นตามด้วยตัวคั่น
- หยดอิเล็กโทรไลต์ (สังกะสีซัลเฟตความเข้มข้น 2 โมลาร์) ปริมาณ 75 ไมโครลิตร อีกครั้ง
- วางทับด้วยขั้วแคโทด NVO_D
- ปิดด้วย Positive electrode case
- แล้วอัดประกอบ โดยใช้เครื่องอัดแบตเตอรี่

3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมแคโทด

- เตรียม NVO_D , ตัวสื่อกระแสไฟฟ้าคาร์บอน (Conductive carbon) และ PVDF ใน DMF ตามอัตราส่วน น้ำหนัก 7:2:1 ตามลำดับ
- ผสมให้เข้ากันโดยใช้ เครื่องกวนสารละลาย เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- จากนั้นนำสารที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันดีแล้ว มาเคลือบลงบนแผ่นกราฟไฟต์ (Graphite paper) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Current collector โดยใช้เครื่องปาด (Doctor blade) ให้ขนาดความหนาของผิวหลังเคลือบอยู่ที่ 120 ไมครอน
- แล้วนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบสูญญากาศ (Dry vacuum oven) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- ขั้นตอนสุดท้าย ใช้เครื่องตัดอิเล็กโทรดตัดเป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร

3.3 การประกอบ และทดสอบแบตเตอรี่

3.3.1 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ($\text{Zn}||\text{Zn}$)

โดยใช้ตัวคั่นเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์แบบที่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ และ แบบไม่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 การทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นแบบเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ และไม่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ ตามจุดประสงค์ของแต่ละการทดสอบ

- 1.) Voltage profiles เพื่อให้ทราบว่าตัวคั่นแต่ละชนิด ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่แตกต่างกันอย่างไร ซึ่งสามารถดูได้จากเวลาที่แบตเตอรี่ลัดวงจร (Short circuit) และค่าความต่างศักย์เกิน (Overpotential)
- 2.) การประเมินค่าประสิทธิภาพ (Rate performance)
- 3.) การประเมินค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical performance)

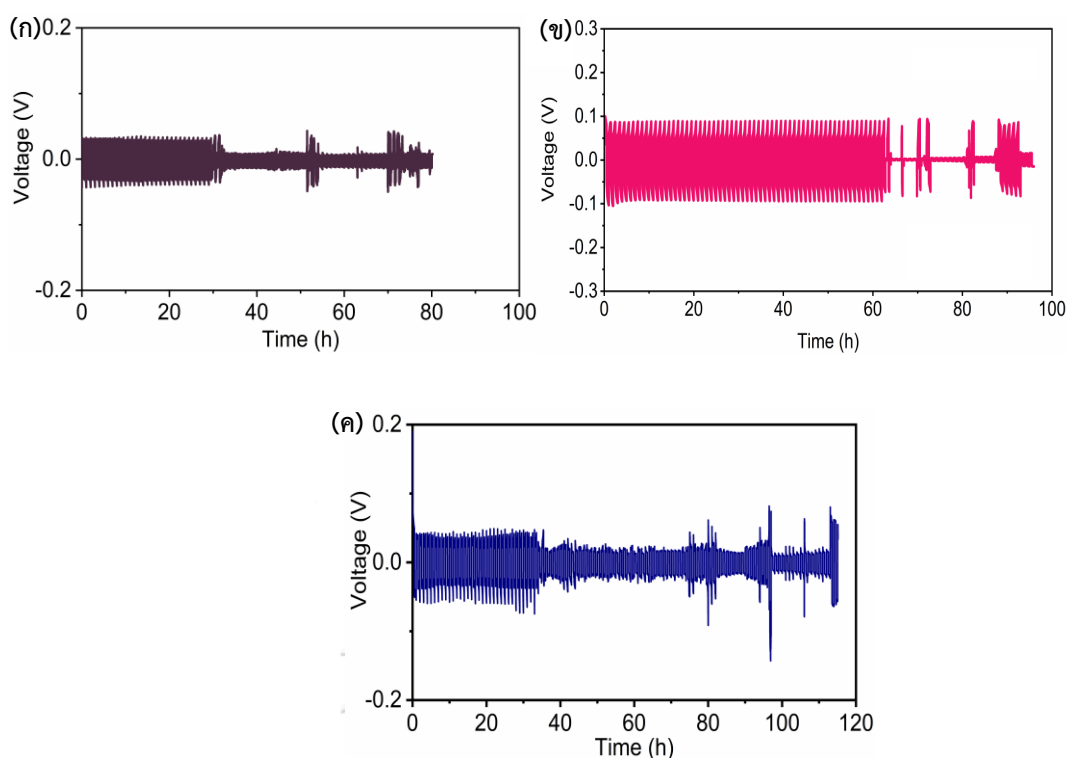
- โวลต์แอมเพอเมทรี-สแกนเชิงเส้น (Linear scan voltammetry, LSV)
 - ทาเฟลเคิร์ฟ (Tafel curve) ทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current) ของวัสดุแอโนดสังกะสี
 - การทดสอบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) สำหรับทดสอบความต้านทานภายในแบตเตอรี่
- 4.) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ของขั้วสังกะสีแอโนดหลังจากผ่านการใช้งาน
- 5.) การวิเคราะห์ด้วยขั้วแอโนดสังกะสีหลังจากผ่านการใช้งานกล้องจุลทรรศน์แบบโฟกัสร่วมชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน (Laser confocal microscopy)
- 3.3.2 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม (Zn||Ti)
- 1.) ทดสอบประสิทธิภาพการอัด-คายประจุ (Coulombic efficiencies)
- 3.3.3 การทดสอบแบตเตอรี่ (Zn||NVO₂ full batteries)
- โดยใช้ตัวคั่นตัวคั่นเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ และไม่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการทดสอบทั้งหมด 7 การทดสอบเพื่อให้ได้ค่าต่างๆมาเปรียบเทียบกันในแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นแต่ละชนิด
- 1.) การประเมินค่าประสิทธิภาพ เพื่อทดสอบค่าความจุจำเพาะของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นแต่ละชนิด
 - 2.) การประเมินค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical performance)
 - การทดสอบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) สำหรับทดสอบความต้านทานภายในแบตเตอรี่
 - การวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV curves) เพื่อทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction) ในแบตเตอรี่
 - 3.) วิเคราะห์ความเสถียรต่อรอบระยะยาว (Long-term cycling performances) เพื่อทดสอบว่าแบตเตอรี่ใดที่มีค่าความจุของแบตเตอรี่คงเหลือ (Capacity retention) มากกว่ากัน หรือแตกต่างกันอย่างไร
 - 4.) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับวัดความแตกต่างผิวของแอโนดสังกะสี หลังจากการวิเคราะห์ความเสถียรต่อรอบ ระหว่างแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นแต่ละชนิด

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

รายละเอียดเนื้อหาโดยรวมของบทนี้จะอธิบายให้ชัดเจนถึงอิทธิพลของทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ที่เติมลงไปในเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNF) ว่าให้ผลที่แตกต่างจากแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นที่ไม่เติมทั้งสแตนคาร์ไบด์หรือไม่อย่างไร โดยทำการทดสอบทั้งหมดดังนี้

4.1 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร (Zn||Zn batteries)

เพื่อทดสอบว่าการทำงานของตัวคั่นที่เติมทั้งสแตนคาร์ไบด์ในการใช้งานกับแบตเตอรี่เป็นระยะเวลานานๆจะส่งผลอย่างไรกับขั้วแอโนดสังกะสี (Zinc anode) โดยการทดสอบ เพื่อให้ลดเวลาในการทดสอบและสะดวกต่อการดำเนินการทดลอง จึงเริ่มจากการทดลองจากแบตเตอรี่แบบสมมาตรที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณส่วนผสมของ ปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่ 15, 20 และ 25 กรัม และทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ค่าหนึ่ง คือ 0.1 กรัม ภายใต้การทดลองที่มีความหนาแน่นกระแส (Current density) ที่ 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ดังตารางที่ 3 เพื่อหาปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป



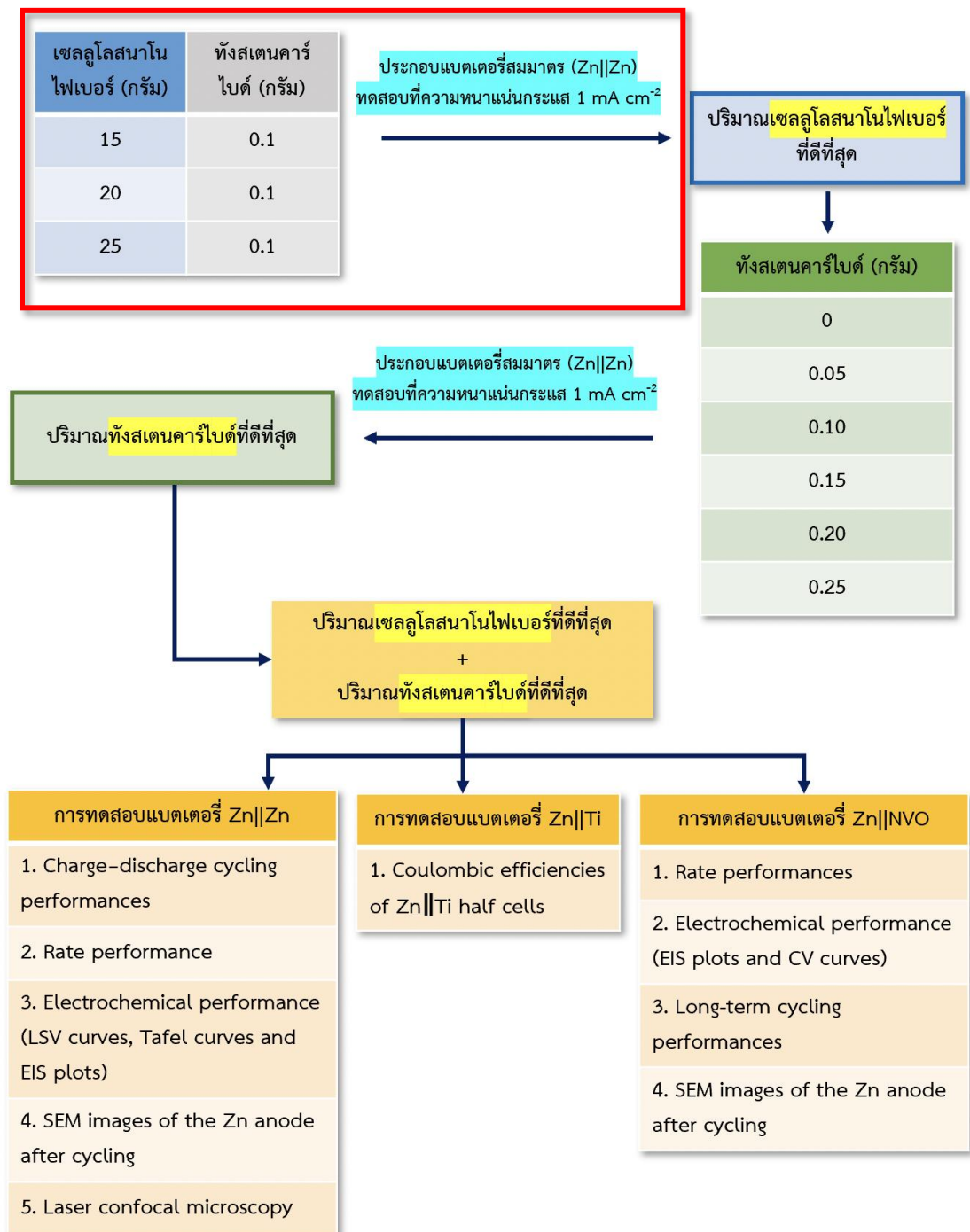
รูปที่ 33 โปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไป (Voltage profiles) ของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ก) ตัวคั้นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 15 กรัม (ข) ตัวคั้นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม และ(ค) ตัวคั้นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 25 กรัม

ในขั้นตอนแรก ต้องทำการทดสอบแบตเตอรี่ที่ใช้กับตัวคั้นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน โดยไม่ได้ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อน โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 33 จะเห็นได้ว่า ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่มีปริมาณ 15 กรัม ให้อายุการใช้งานที่ 27 ชั่วโมง ดังรูปที่ 33(ก) ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่มีปริมาณ 20 กรัม ให้อายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดที่ 60 ชั่วโมง ดังรูปที่ 33(ข) และปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่มีปริมาณ 15 กรัม ให้อายุการใช้งานที่ 30 ชั่วโมง ดังรูปที่ 33(ค) จะพบว่าปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ 20 กรัม ให้อายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า ที่ปริมาณ 15 และ 25 กรัม จากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบโดยการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ปริมาณ 0.1 กรัม ลงใน ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ทั้ง 3 ปริมาณ (15, 20 และ 25 กรัม) เนื่องจากเราต้องการศึกษาผลกระทบของการเติมทั้งสแตนคาร์ไบด์ลงในเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ ต่อการป้องกันการเกิดสังกะสีเดนไดรต์ โดยทำการทดสอบทั้งหมดดังตารางต่อไปนี้ (ตารางที่ 3)

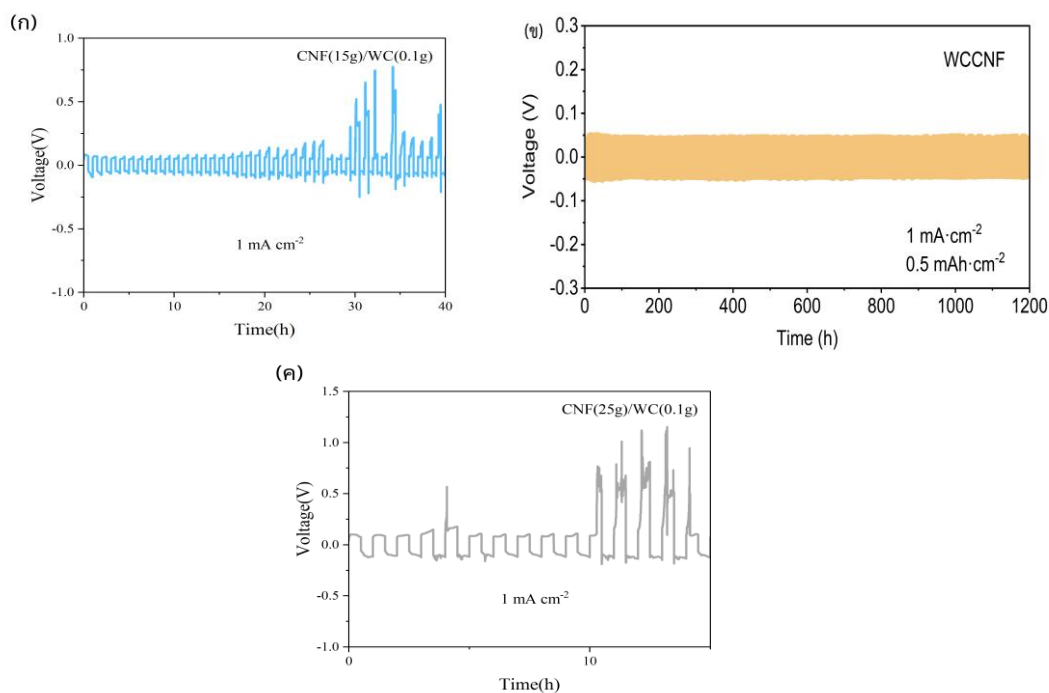
ตารางที่ 3 การทดสอบชิ้นงานแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่น 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (กรัม)	ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบต์ (กรัม)
CNF15/WC0.1	15	0.1
CNF20/WC0.1	20	0.1
CNF25/WC0.1	25	0.1



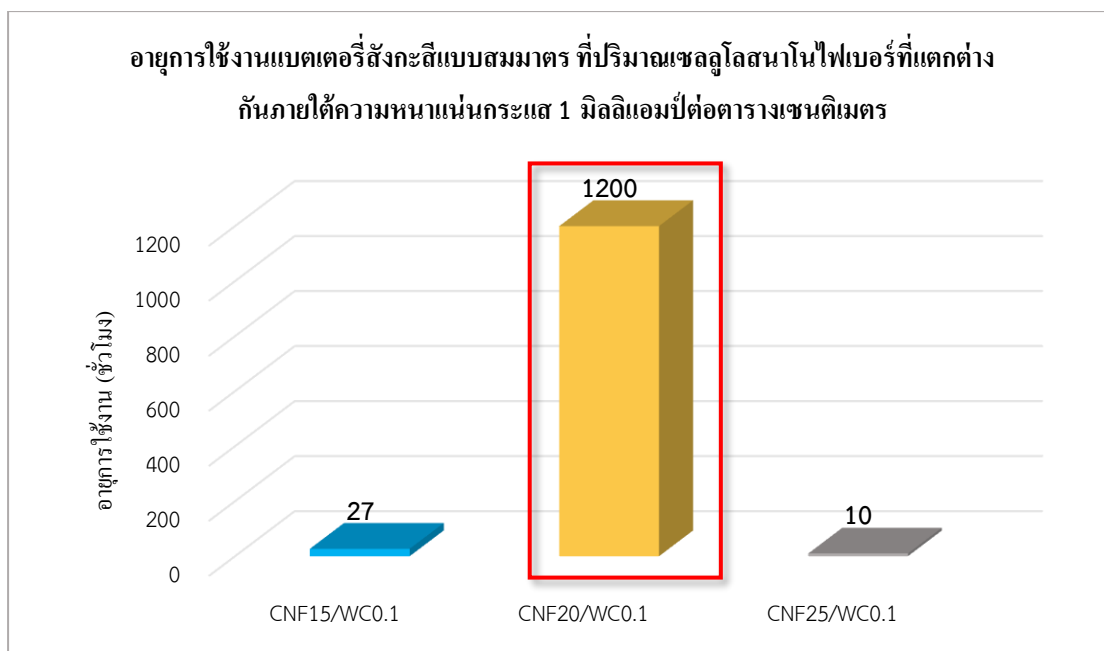


รูปที่ 34 ขั้นตอนที่ดำเนินการ (ทดสอบหาปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่สุด)



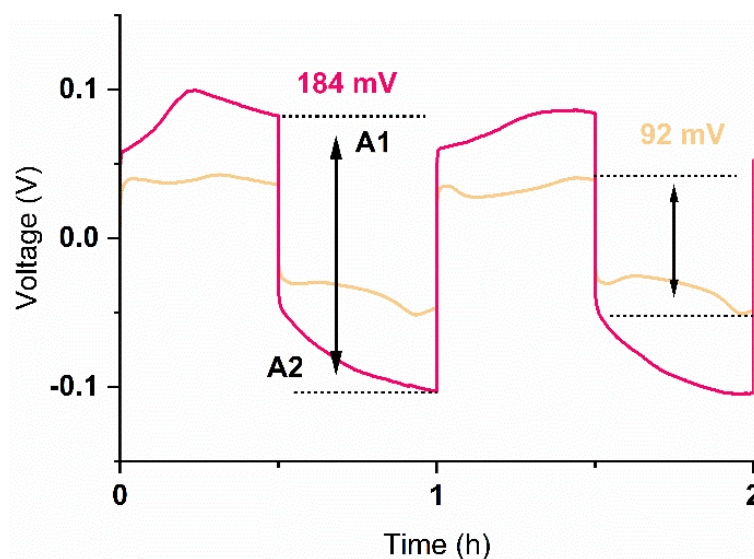
รูปที่ 35 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไป (Voltage profiles) ของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์ 0.1 กรัม แต่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ก) ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 15 กรัม (ข) ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม และ(ค) ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 25 กรัม

จากรูปที่ 35 แสดงโพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์ 0.1 กรัม แต่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน โดยจากพบว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 25 กรัม ให้อายุการใช้งานที่สั้นที่สุดที่ 10 ชั่วโมง ดังรูปที่ 35(ค) รองลงมาคือแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 15 กรัม คือ 27 ชั่วโมง ดังรูปที่ 35(ก) และแบตเตอรี่ที่ให้อายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดที่ 1,200 ชั่วโมง ดังรูปที่ 35(ข) คือแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม



รูปที่ 36 สรุปผลการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกันภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

โดยผลการทดสอบแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ให้ผลดังนี้ แบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.1 กรัม ให้อายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า 1,200 ชั่วโมงดังรูปที่ 36 ในทางกลับกันแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 15 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.1 กรัม จะเห็นได้ว่าการลัดวงจร (Short circuit) หลังจากผ่านการใช้งานไปเพียง 27 ชั่วโมง โดยมีค่าความต่างศักย์เกินที่ 166 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 36 อันเนื่องจากปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ 15 กรัม น้อยเกินไปทำให้ตัวคั่นบางมากและมีรูปขนาดใหญ่ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการลัดวงจรได้ง่าย ในส่วนของแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 25 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.1 กรัม จะเห็นได้ว่าการลัดวงจร (Short circuit) หลังจากผ่านการใช้งานไปเพียงแค่ 10 ชั่วโมงเท่านั้น โดยมีค่าความต่างศักย์เกินที่สูงถึง 303 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 36 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทพะจุที่น้อย



รูปที่ 37 ตำแหน่งสำหรับการคำนวณค่าความต่างศักย์เกิน

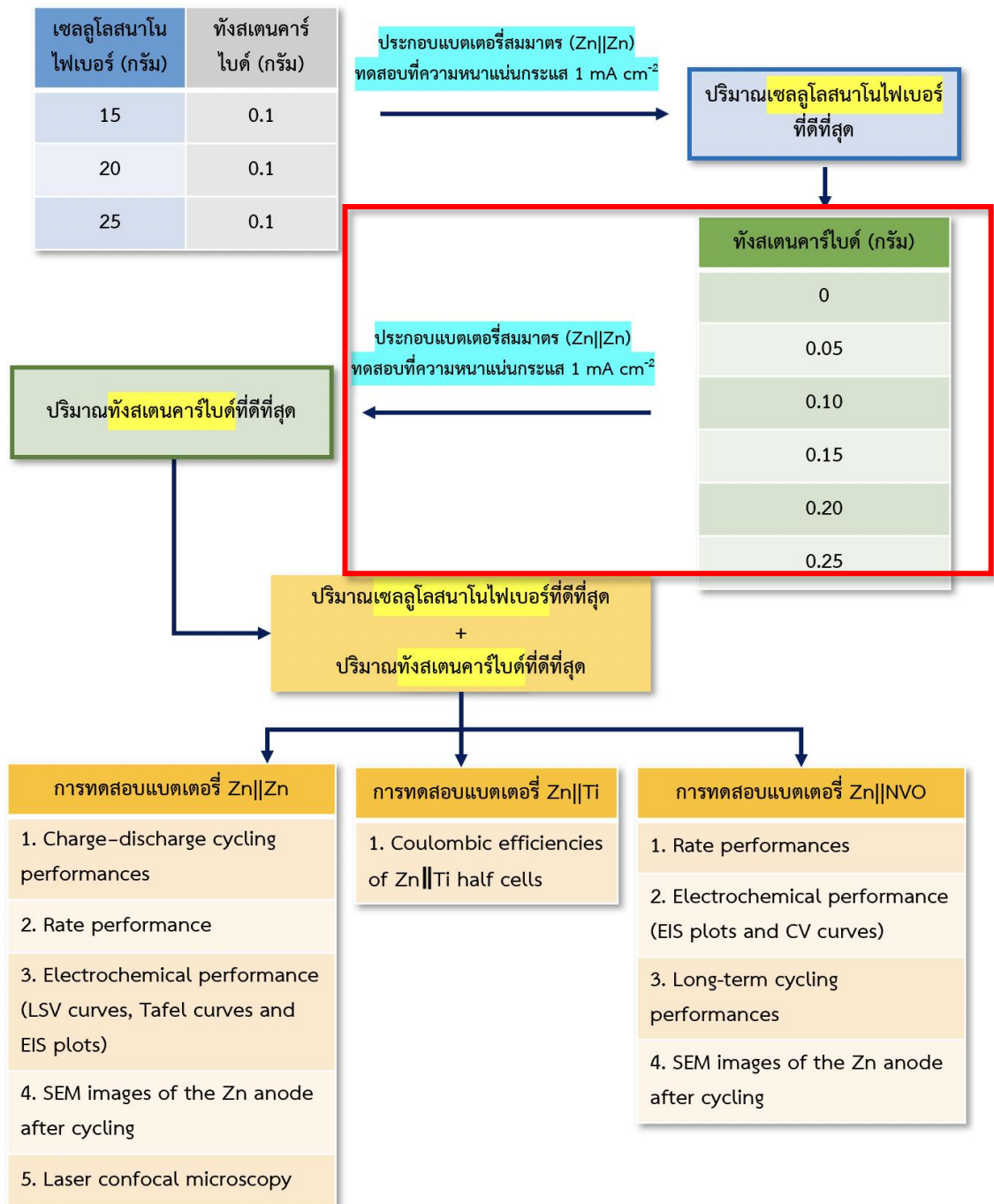
โดยสามารถคำนวณค่าความต่างศักย์เกิน (Overpotential) ที่ 92 มิลลิโวลต์ โดยค่าความต่างศักย์เกินนั้นสามารถคำนวณได้จากระยะห่างตามแกน Y (Voltage (V)) จากตำแหน่ง A1 และ A2 ตามรูปที่ 37 [11] โดยในแบตเตอรี่นั้นค่าความต่างศักย์เกิน คือ ค่าความต่างศักย์ (หรือการวัดแรงดันไฟ) ระหว่างแรงดันที่กำหนดตามทฤษฎี หรือทางเทอร์โมไดนามิกส์ กับแรงดันจริงภายใต้สภาวะการทำงาน [53] หากมีค่าความต่างศักย์เกินสูงจะมีความหมายว่า มีความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer resistance) ที่สูง เนื่องมาจากค่าความต้านทานเป็นค่าที่เกี่ยวข้องอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V) และกระแส (I) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ตั้งค่ากระแสคงที่ เพื่อเป็นตัวแปรควบคุมในการทดลอง (1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) จึงพบว่าสาเหตุของค่าความต่างศักย์เกินที่คำนวณได้จากแกน Y ที่สูงนั้น อาจมาจากความต้านทานการถ่ายโอนประจุที่สูงของชิ้นงาน ซึ่งจะสามารถยืนยันและเปรียบเทียบได้ชัดเจน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นที่ผสมเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ 20 กรัม

จากผลการทดสอบแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ต่างกัน 3 ปริมาณ คือ 15, 20 และ 25 กรัม แต่มีปริมาณทั้งสแตนคราไบต์ที่เท่ากัน คือ 0.1 กรัม ได้ผลสรุปออกมาว่า ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ 20 กรัม ให้ประสิทธิภาพการในใช้งานที่ดีที่สุด เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณทั้งสแตนคราไบต์ที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยรายละเอียดปริมาณทั้งสแตนคราไบต์จะระบุในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (กรัม)	ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ (กรัม)
CNF20/WC0	20	0
CNF20/WC0.05	20	0.05
CNF20/WC0.10	20	0.10
CNF20/WC0.15	20	0.15
CNF20/WC0.20	20	0.20
CNF20/WC0.25	20	0.25

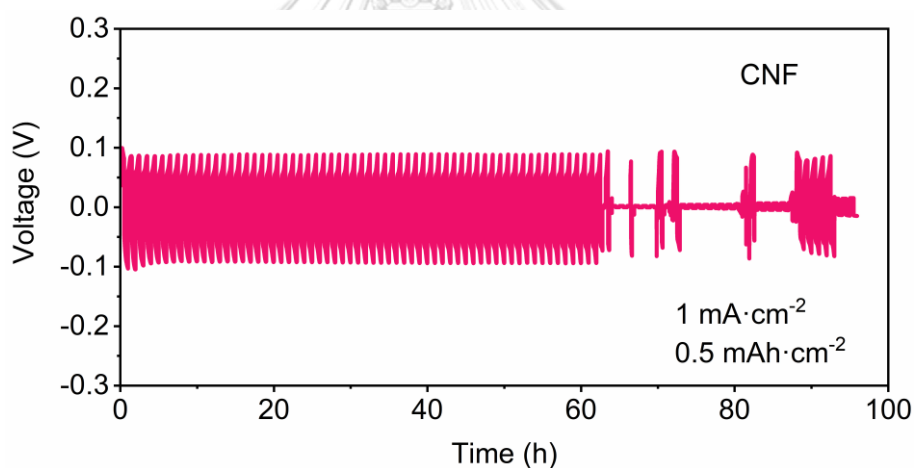




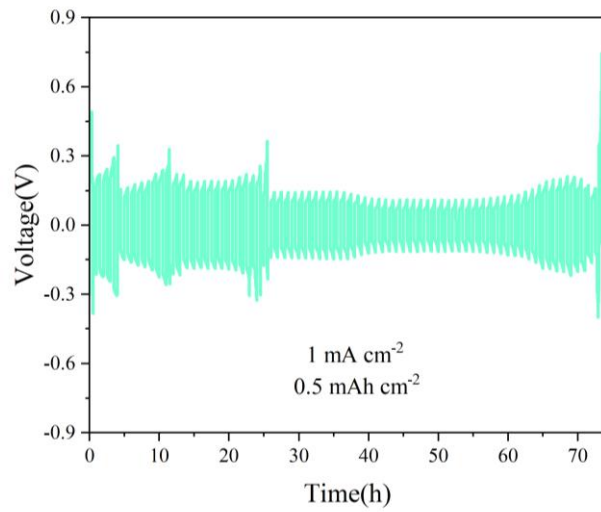
รูปที่ 38 ขั้นตอนที่กำลังดำเนินการ (ทดสอบหาปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด)

จากรูปที่ 38 แสดงขั้นตอนการดำเนินการทดสอบขั้นตอนต่อไป หลังจากที่สามารถหาปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้แล้ว(20 กรัม) โดยขั้นตอนการทดสอบขั้นตอนต่อไป คือ การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สมมาตรภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ต่างกัน เพื่อหาปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีขั้นตอนดังนี้

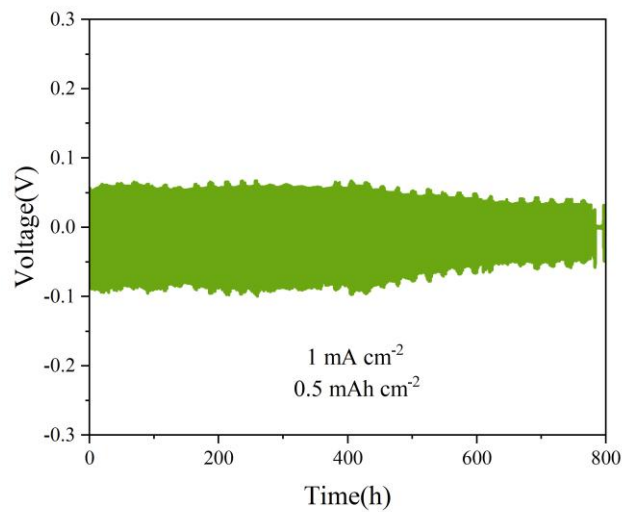
ทำการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ลงในเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ โดยมีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 ปริมาณ ดังนี้ 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 กรัม ตามตารางที่ 4 โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆให้เท่ากันทั้งหมด จากนั้นนำตัวคั่นทุกตัวอย่างมาประกอบแบตเตอรี่สมมาตร โดยเลือกทดสอบด้วยความหนาแน่นกระแสที่ 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เพื่อหาปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาทดสอบเชิงลึกอื่นๆต่อไป ซึ่งมีผลการทดสอบดังในรูปที่ 39 ถึง 45 ต่อไปนี้



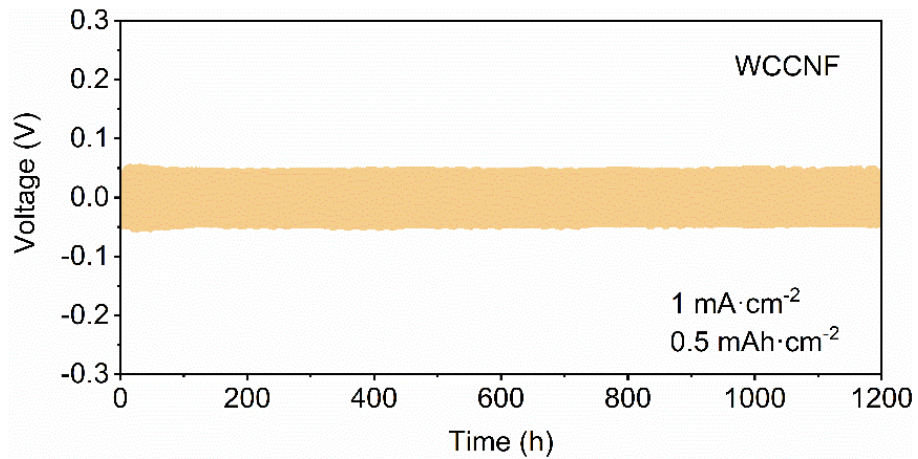
รูปที่ 39 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ที่ไม่ได้ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 40 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลส
นาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์ 0.025 กรัม ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์
ต่อตารางเซนติเมตร

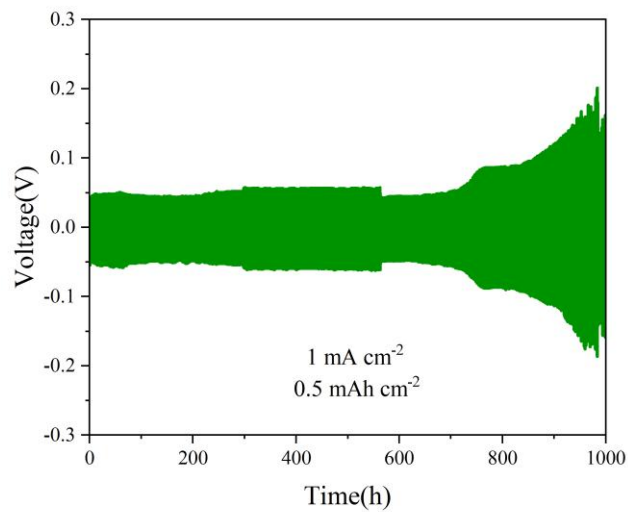


รูปที่ 41 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลส
นาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์ 0.05 กรัม ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์
ต่อตารางเซนติเมตร



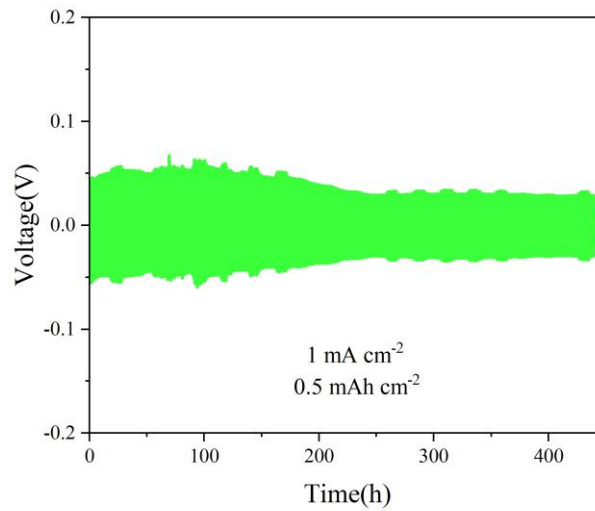
รูปที่ 42 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลส นาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์ 0.1 กรัม ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อ

ตารางเซนติเมตร

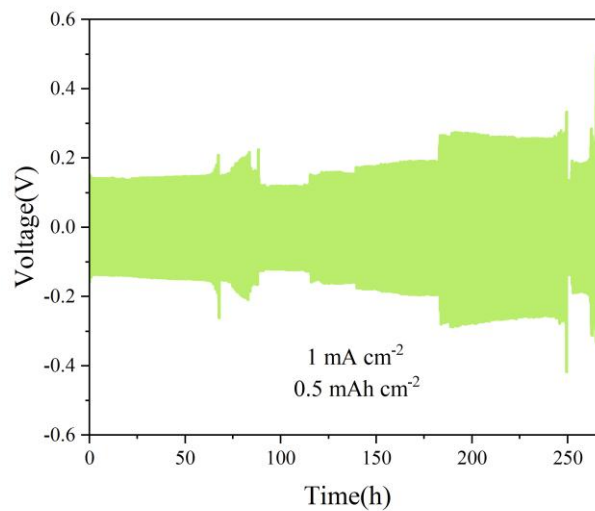


รูปที่ 43 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลส นาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์ 0.15 กรัม ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์

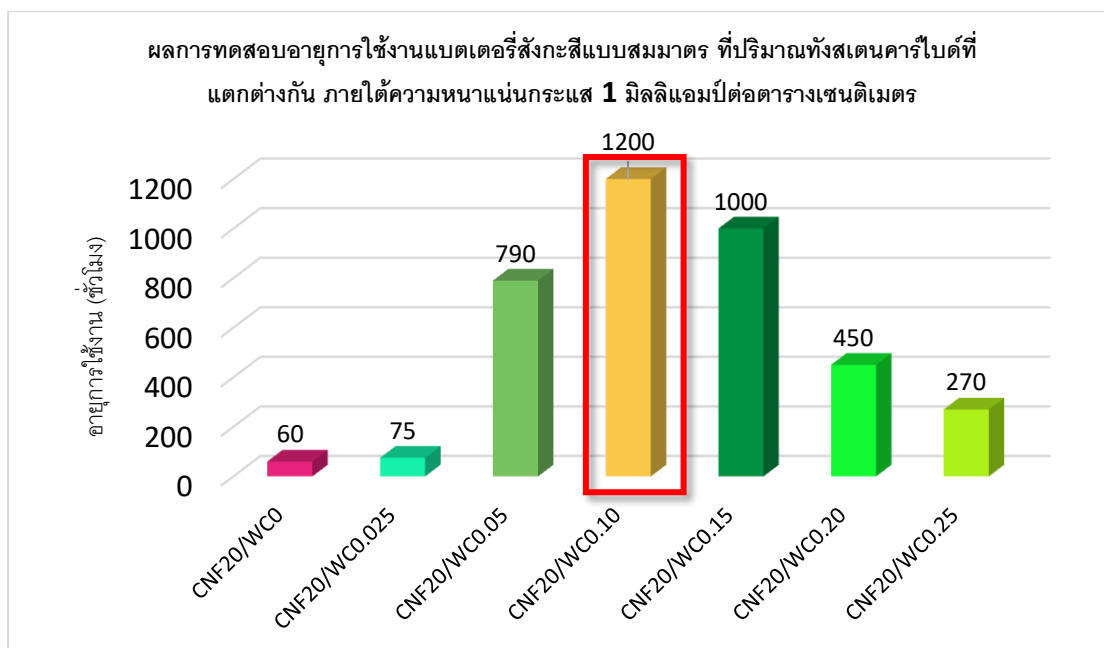
ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 44 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลส นาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.20 กรัม ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 45 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลส นาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.25 กรัม ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ ต่อตารางเซนติเมตร



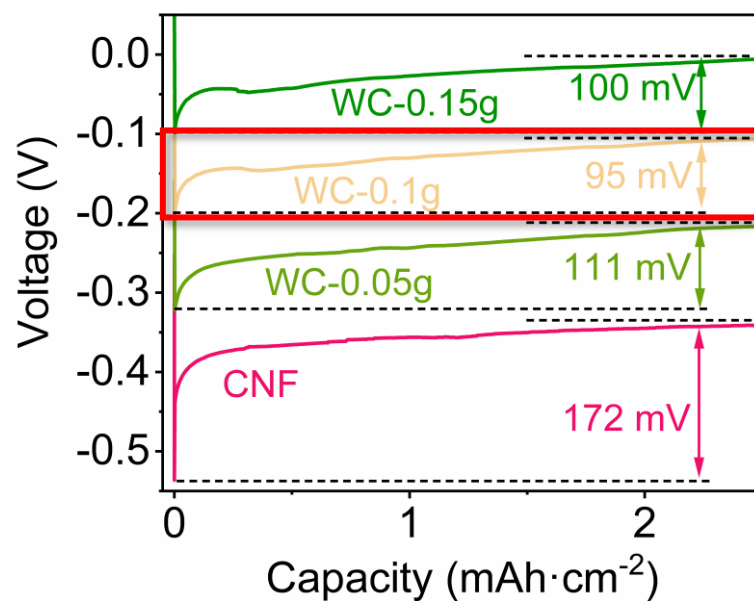
รูปที่ 46 สรุปผลการทดสอบอายุการใช้งานแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบชิ้นงานแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ปริมาณเซลลูโลส นาโนไฟเบอร์ (กรัม)	ปริมาณทั้งสแตน คาร์ไบด์ (กรัม)	อายุการใช้งานที่ความหนาแน่น กระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตาราง เซนติเมตร (ชั่วโมง)
20	0	60
20	0.025	75
20	0.05	790
20	0.10	1,200
20	0.15	1,000
20	0.20	450
20	0.25	270

จากผลการทดสอบในรูปที่ 39 ถึง 46 และตารางที่ 5 ซึ่งเป็นตารางสรุปอายุการใช้งาน จะเห็นว่าปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ 0.05, 0.10 และ 0.15 กรัม มีแนวโน้มว่าจะเป็นปริมาณทั้งสแตน

คาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้อายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์อื่นๆ คือ 790, 1,200 และ 1,000 ตามลำดับ ดังนั้นจึงต้องนำปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ทั้ง 3 ค่า มาวิเคราะห์ เพื่อหาเหตุผลที่ชัดเจนว่าตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์เท่าใด มีความเหมาะสมที่สุด และเนื่องจากเหตุผลใด โดยใช้วิธีการทดสอบโพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนด เพื่อหาว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์เท่าใด มีความสามารถ หรือความรีนไหลในการถ่ายเทประจุมากกว่ากัน (Nucleation overpotential) (รูปที่ 47)



รูปที่ 47 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนดโดยใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน

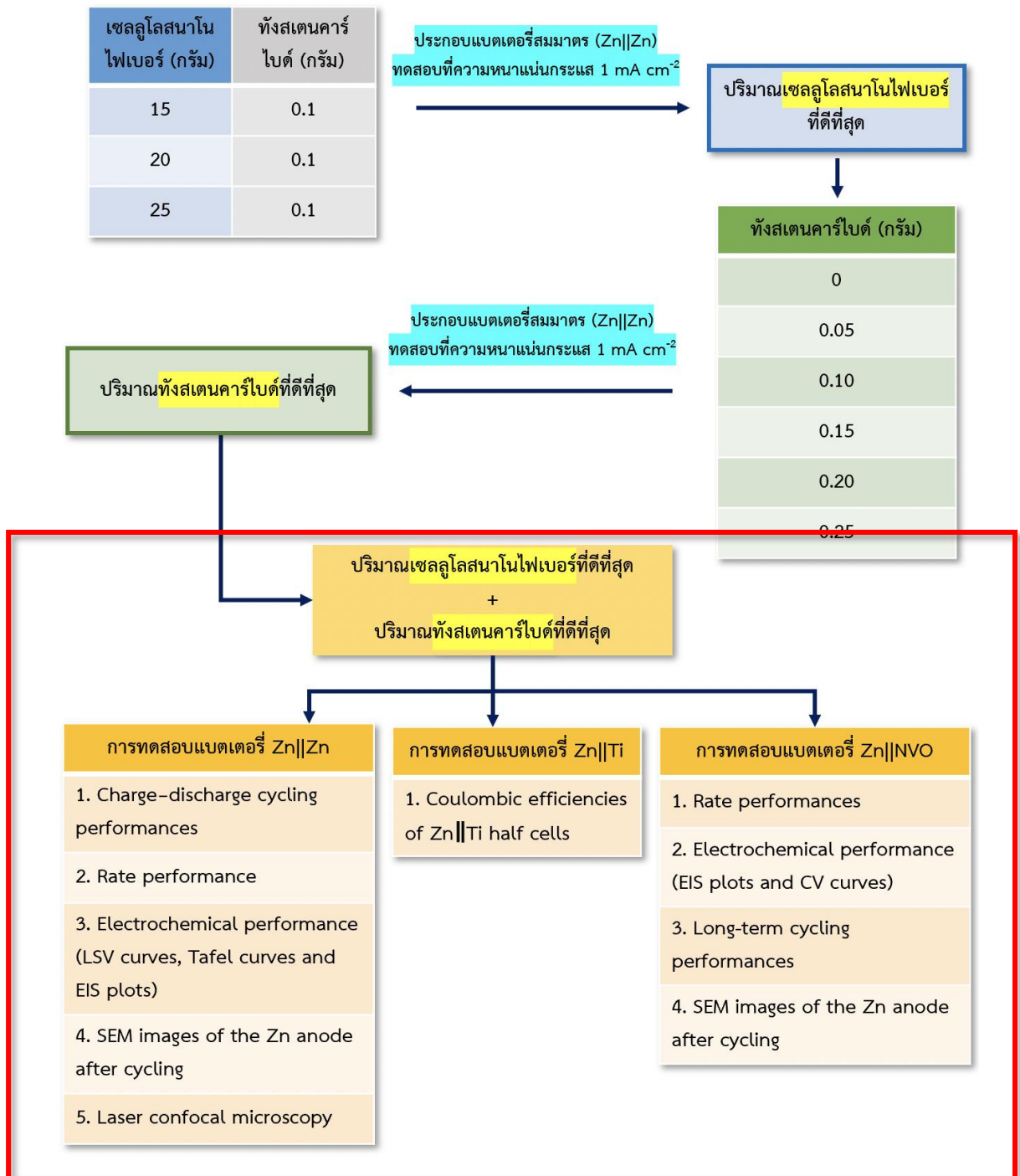
จากรูปที่ 47 ผลการวิเคราะห์โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนด โดยใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน แสดงค่าศักยภาพนิวเคลียสของสังกะสีที่มากเกินไปของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนดภายใต้ตัวคั่นที่แตกต่างกัน แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs จะสร้างนิวเคลียสของสังกะสีที่มีมากกว่าที่ 172 มิลลิโวลต์, แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC0.05 กรัม มีค่า 111 มิลลิโวลต์, แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC0.15 กรัม มีค่า 100 มิลลิโวลต์ และแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC0.1 กรัม มีค่า 95 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าการรวมอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์เข้ากับเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ แสดงการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของนิวเคลียสสังกะสีที่มีศักยภาพมากเกินไป สามารถบ่งชี้ได้ว่าอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์สามารถปรับปรุงจลนพลศาสตร์ของนิวเคลียส

สังกะสี สามารถเร่งการเกิดนิวเคลียส และการสะสมของสังกะสีบนขั้วแอโนดที่เป็นระเบียบสม่ำเสมอมากขึ้น



รูปที่ 48 รูปภาพการทดสอบแบตเตอรี่ด้วยเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ BTS (BTS battery tester)

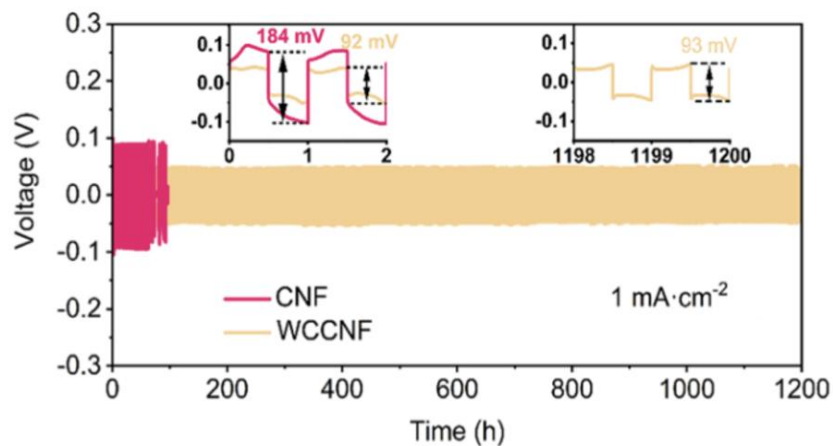
จากรูปที่ 48 แสดงการทดสอบแบตเตอรี่ด้วยเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ BTS โดยเครื่องนี้สามารถทดสอบแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว ได้ทั้งแบตเตอรี่สมมาตร, แบตเตอรี่ Zn||Ti และแบตเตอรี่ Zn||NVO โดยใช้ทดสอบทั้งการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร, ทดสอบค่าศักย์ภาพนิวเคลียสของสังกะสีที่มากเกินไปของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนด, ทดสอบค่าค่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่, ทดสอบค่าประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุ และทดสอบประสิทธิภาพการอัด-คายประจุของการวนซ้ำระยะยาว



รูปที่ 49 ขั้นตอนที่กำลังดำเนินการ

หลังจากที่ได้ตัวคั่นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์และปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบต์ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ขั้นตอนต่อไปที่แสดงดังรูปที่ 49 คือการนำตัวคั่นที่มีปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม และปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบต์ 0.1 กรัม เนื่องจากให้อายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดที่ 1,200 ชั่วโมง

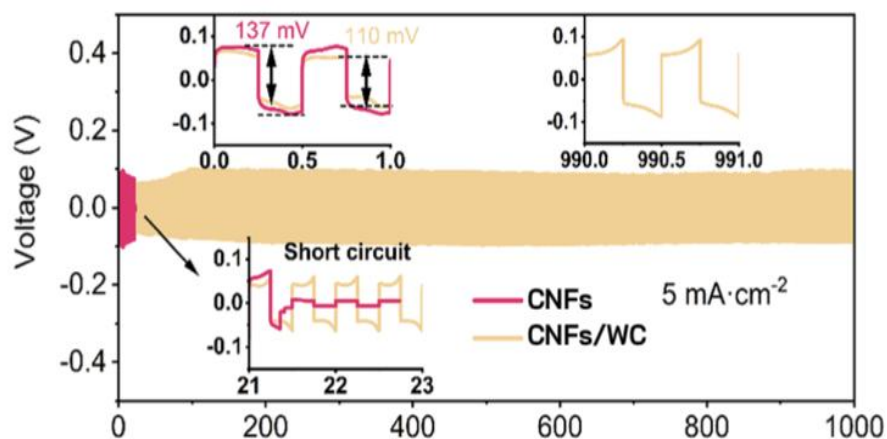
และมีค่าความต่างศักย์เกินต่ำที่สุดที่ 92 มิลลิโวลต์ ดังนั้นตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบต์ที่ 0.10 กรัม มาวิเคราะห์และทดสอบด้วยกระบวนการอื่นๆ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับตัวคั่นที่ไม่ได้ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นต่อไป โดยแทนตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบต์ ว่าตัวคั่น CNFs/WC และแทนตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ว่าตัวคั่น CNFs



รูปที่ 50 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC และตัวคั่น CNFs ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตาราง

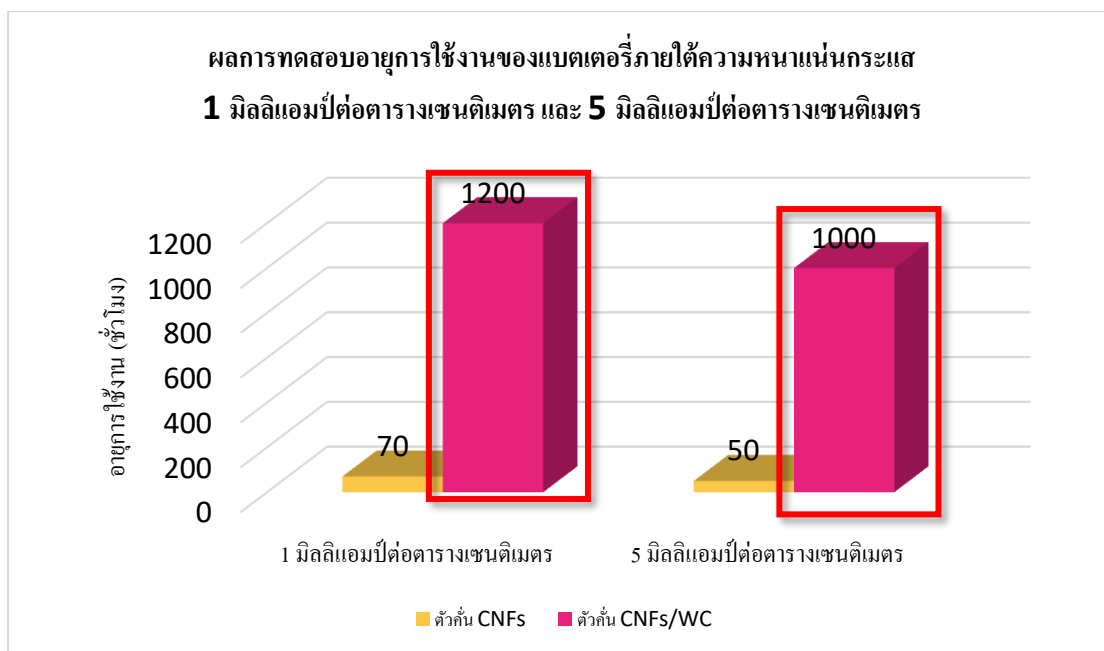
เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



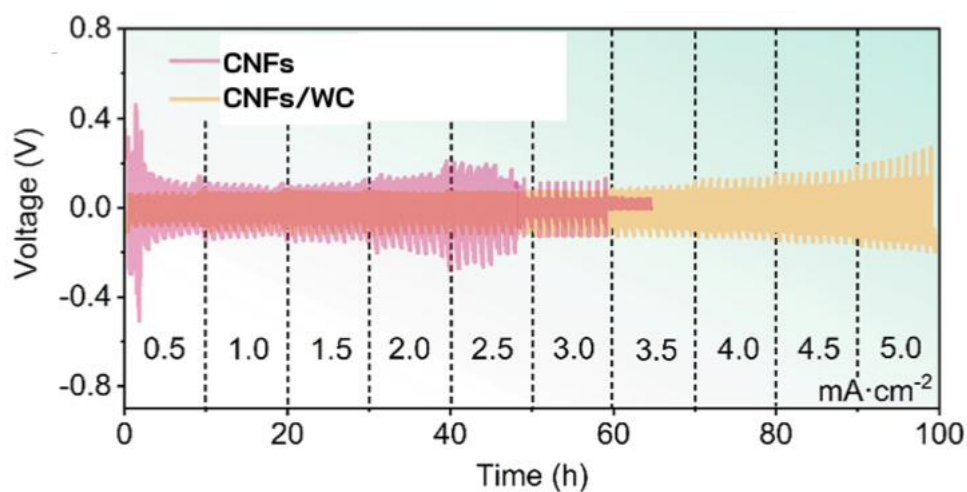
รูปที่ 51 โพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าทั่วไปของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC และตัวคั่น CNFs ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 5 มิลลิแอมป์ต่อ

ตารางเซนติเมตร



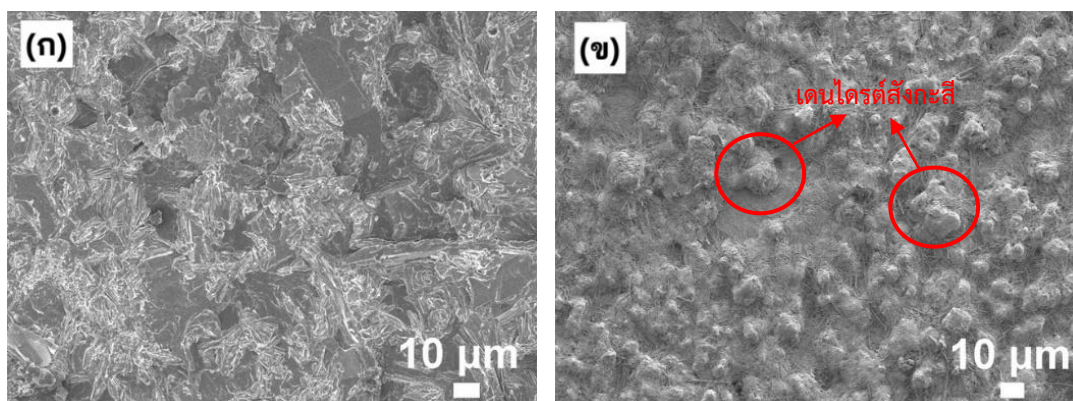
รูปที่ 52 ผลการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของตัวค้น CNFs/WC ที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.1 กรัม ในเรื่องของการเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพการย้อนกลับได้ของอิเล็กโทรดสังกะสีให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จึงได้นำมาทดสอบเปรียบเทียบกับตัวค้น CNFs ที่ความหนาแน่นกระแสที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ต่ำไปจนถึงสูงขึ้นไป 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยจากผลการทดสอบที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวค้น CNFs/WC แสดงอายุการใช้งานที่ยาวนานที่ 1,200 ชั่วโมง โดยมีค่าความต่างศักย์เกินต่ำที่ 92 มิลลิโวลต์ และมีความเสถียรมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 50 ในทางตรงกันข้าม แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวค้น CNFs แสดงอายุการใช้งานสั้นที่ 70 ชั่วโมง และมีค่าความต่างศักย์เกินที่มากกว่าที่ 184 มิลลิโวลต์ เนื่องจากการสะสมของเดนไดรต์สังกะสีและปฏิกิริยาข้างเคียงที่รุนแรง ยิ่งไปกว่านั้นแม้ในการทดสอบที่ภายใต้ความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้นไป 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวค้น CNFs/WC สามารถให้อายุการใช้งานที่เสถียรเป็นเวลากว่า 1,000 ชั่วโมง โดยไม่มีความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าที่ชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวค้น CNFs ที่ลัดวงจรอย่างรวดเร็วหลังจากการใช้งาน 100 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 51 ความแตกต่างดังกล่าว ทั้งในเรื่องของอายุการใช้งานและค่าความต่างศักย์เกินระหว่างตัวค้น CNFs/WC และตัวค้น CNFs ดังแสดงในรูปที่ 52 แสดงให้เห็นว่าตัวค้น CNFs/WC สามารถส่งเสริมนิวเคลียสสังกะสีที่สม่ำเสมอและส่งเสริมการชุบ/ลอกสังกะสีแบบย้อนกลับได้บนขั้วแอโนดสังกะสี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [54, 55]



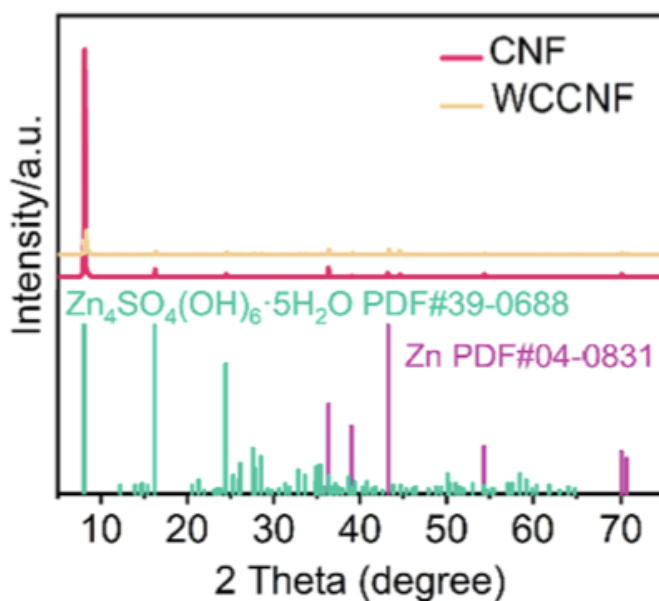
รูปที่ 53 ค่าประสิทธิภาพ (Rate performance) ของแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC และตัวคั่น CNFs ที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ จาก 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

การประเมินค่าประสิทธิภาพ ของแบตเตอรี่สมมาตรได้รับการทดสอบที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ จาก 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 53 ค่าความต่างศักย์เกินของแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่น CNFs เกิดความผันผวนอย่างรุนแรงเมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นกระแส 2.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และเกิดการลัดวงจรที่ความหนาแน่นกระแสเพียง 3.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แตกต่างจากแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC จะเห็นได้ว่าสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ความหนาแน่นกระแส 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งบ่งชี้ว่าความไม่เสถียรที่ขั้วแอโนดสังกะสีเกิดจากตัวคั่น CNFs โดยเฉพาะเมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นกระแสสูง แต่สำหรับตัวคั่น CNFs/WC จะแสดงค่าความต่างศักย์เกินเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 164 เป็น 297 มิลลิโวลต์ เนื่องมาจากความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นจาก 0.5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าตัวคั่น CNFs อย่างเห็นได้ชัดเจน



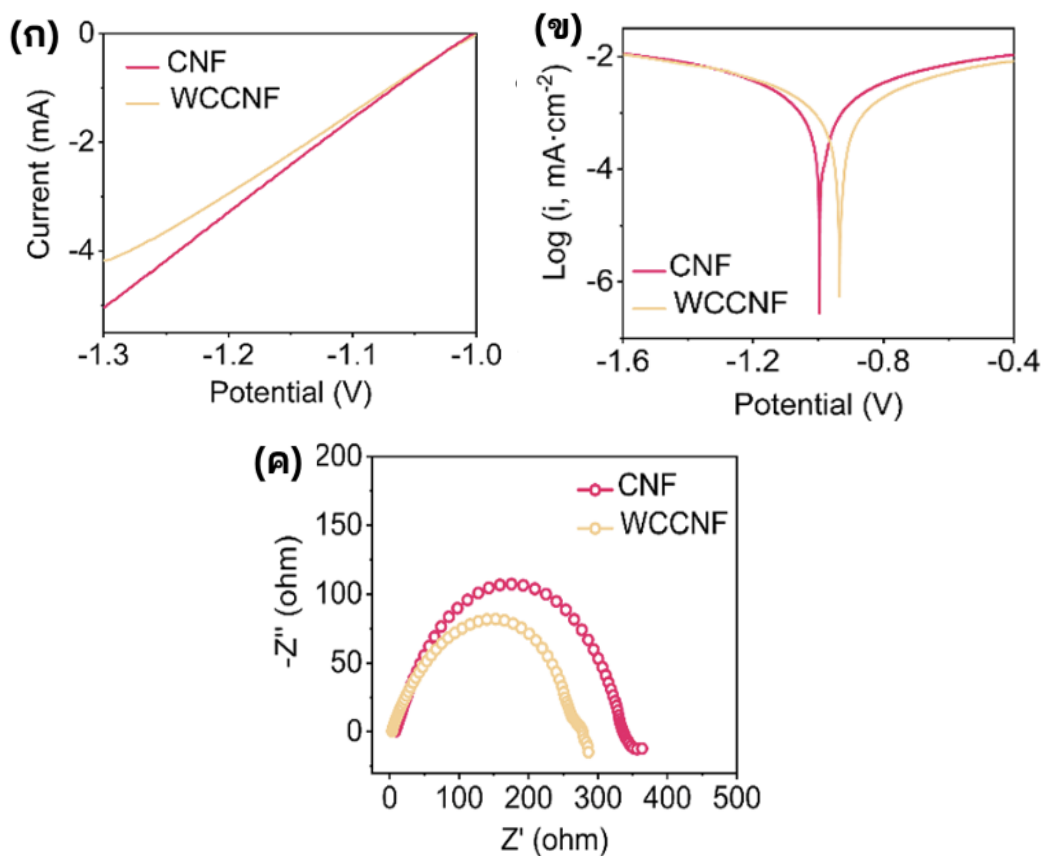
รูปที่ 54 ผล SEM ของสังกะสีแอโนดในแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่นที่ต่างกัน
หลังจากผ่านการใช้งาน (ก) ตัวคั่น CNFs/WC และ(ข) ตัวคั่น CNFs

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเสถียรและประสิทธิภาพการย้อนกลับได้ของแอโนดสังกะสีเนื่องจากตัวคั่น CNFs/WC จึงทำการวิเคราะห์แอโนดสังกะสีหลังจากผ่านการใช้งาน 100 รอบที่ 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะสังเกตเห็นว่าขั้วแอโนดสังกะสีของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC จะรักษาฐานวิทยาของพื้นผิวที่มีความสม่ำเสมอ ตามรูปที่ 54(ก) ในทางตรงกันข้ามขั้วแอโนดสังกะสีของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs จะมีสังกะสีส่วนที่ยื่นออกมาจำนวนมาก ด้วยการซ้อนทับกันของเส้นใยเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ ตามรูปที่ 54(ข) ส่วนที่ยื่นออกมาของสังกะสีเหล่านี้ สามารถสร้างการกระจายสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอและปฏิกิริยาเอฟเฟกต์ส่วนปลาย (Tip effect) ส่งผลทำให้เกิดเดนไดรต์สังกะสีและการสะสมของสังกะสีที่ตายแล้วรุนแรงขึ้นนำไปสู่ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพคุลอมบิกที่ลดลง และในที่สุดแบตเตอรี่ก็จะเกิดการลัดวงจร จากเหตุผลเหล่านี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าตัวคั่น CNFs/WC สามารถทำให้อายุการใช้งานของสังกะสีเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเพื่อให้ได้ขั้วสังกะสีแอโนดที่ปราศจากเดนไดรต์



รูปที่ 55 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซั้วแอโนดสังกะสีหลังจากผ่านการใช้งาน

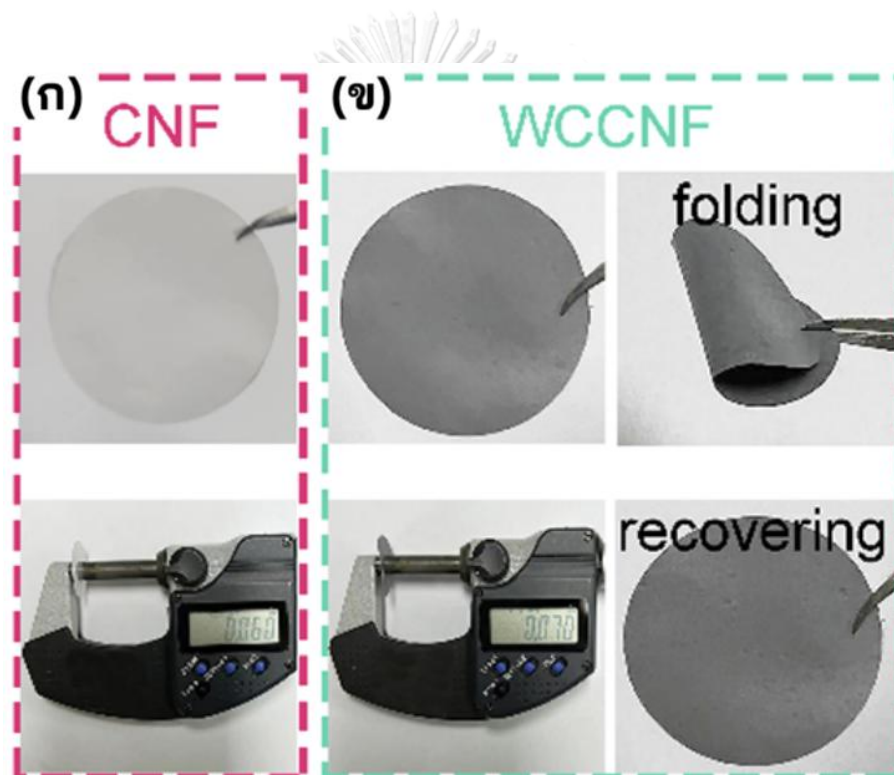
จากรูปที่ 55 เพื่อให้เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพทั้งสแตนคาร์ไบด์มากขึ้น ต่อจากนี้จึงทำการเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC ที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.1 กรัม (สีชมพู) และแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs (สีเหลือง) จากการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ของแอโนดสังกะสีหลังจากการใช้งานเพื่อตรวจสอบการเกิดผลพลอยได้ (By-product) และการสร้างพื้นผิวที่มีความหยาบ (Surface passivation) บนแอโนดสังกะสี ผลการวิเคราะห์ XRD ของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs แสดงจุดสูงสุด (Peake) ของ $Zn_4SO_4(OH)_6 \cdot 5 H_2O$ (PDF: 39-0688) ที่ 8.1, 16.2 และ 24.4 องศา ซึ่งบ่งชี้ถึงความร้ายแรงกว่าของการก่อตัวของผลพลอยได้ในระหว่างกระบวนการอัด-คายประจุเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความต้านทานการถ่ายโอนประจุอย่างมาก และทำให้คุณสมบัติการหมุนเวียนของแบตเตอรี่ล้มเหลวได้ จากการทดลองและการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้น ความเสถียรระหว่างการใช้งานที่ดีขึ้นของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC นั้นส่วนใหญ่มาจากข้อเท็จจริงที่ว่าตัวคั่น CNFs/WC ไม่เพียงแต่สามารถปรับปรุงความสามารถในการต้านการกัดกร่อนบนพื้นผิวและปรับปรุงจลนพลศาสตร์การถ่ายโอนประจุเท่านั้น แต่ยังสามารถเร่งการสะสมสังกะสีที่สม่ำเสมอบนซั้วแอโนดและยับยั้งการสร้างผลพลอยได้ ซึ่งทำให้ซั้วแอโนดสังกะสีมีความเสถียรและทนทานมากยิ่งขึ้น



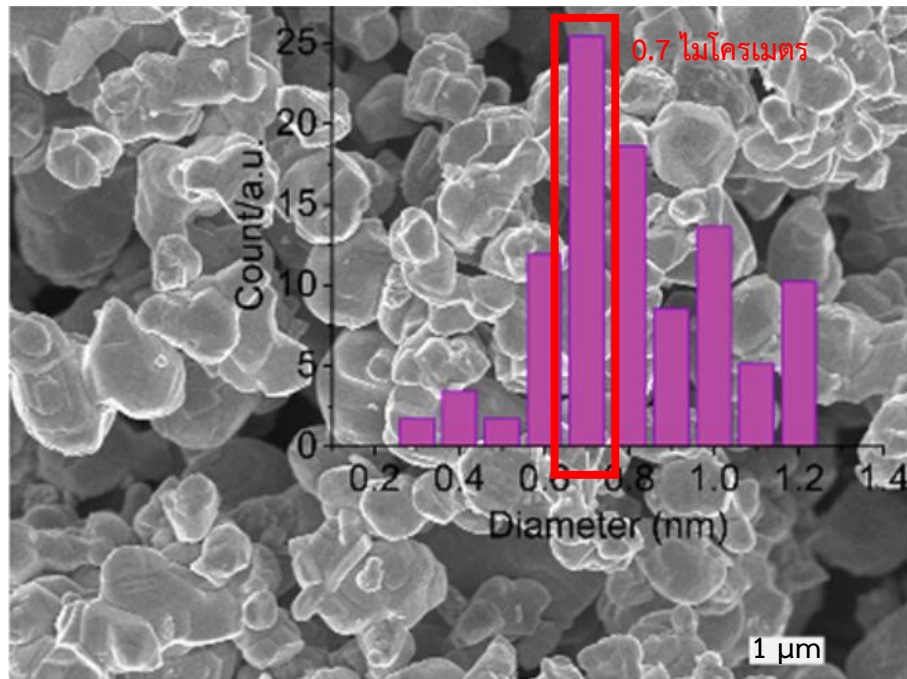
รูปที่ 56 ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่สังกะสีสมมาตรที่ใช้ตัวคั่น CNFs และตัวคั่น CNFs/WC (ก) โวลต์แอมเพอรี-สแกนเชิงเส้น (ข) โพลาริเซชันเชิงเส้น (Tafel curves) (ค) การเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS)

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่สังกะสีสมมาตร ใช้การทดสอบ LSV ตรวจสอบผลกระทบของตัวคั่น CNFs/WC ต่อปฏิกิริยาการวิวัฒนาการของไฮโดรเจน (Hydrogen evolution) โดยใช้โวลต์แอมเพอรี-สแกนเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 56(ก) จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวคั่น CNFs ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าในช่วงศักย์ภาพตั้งแต่ -1.3 ถึง -1.0 โวลต์ มากกว่าตัวคั่น CNFs/WC ซึ่งหมายถึงตัวคั่น CNFs/WC ให้ผลการยับยั้งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อการวิวัฒนาการของไฮโดรเจน ในรูปที่ 56(ข) แสดงผลการทดลองโพลาริเซชันเชิงเส้น สามารถแสดงประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของแต่ละตัวคั่นบนขั้วแอโนดสังกะสี ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนบนขั้วแอโนดสังกะสีของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC มีค่าที่ต่ำที่ 6.26 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs ที่มีค่า 6.56 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยศักยภาพในการกัดกร่อนของตัวคั่น CNFs/WC จะมีค่าเป็นบวกมากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึง

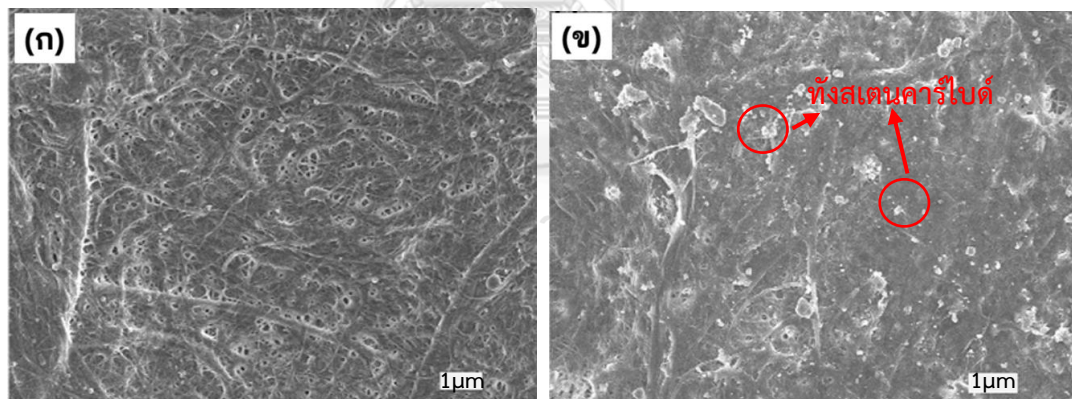
ความสามารถในการต้านการกัดกร่อนบนขั้วแอโนดสังกะสี โดยประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน และประสิทธิภาพการยับยั้งการเกิดวิวัฒนาการ ไฮโดรเจนสามารถนำมาประกอบกับความจริงที่ว่า อนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์สามารถป้องกันการรวมตัวของไอออนและสามารถเป็นแนวทางในการกระจายฟลักซ์ของไอออนสังกะสี โดยการป้องกันโพลาไรเซชันของความเข้มข้น (Preventing concentration polarization), ลดประจุในพื้นที่ใกล้กับขั้วแอโนดสังกะสี และลดสิ่งกีดขวางที่พื้นผิว เพื่อปรับปรุงจลนพลศาสตร์ของการขนส่งประจุ ดังนั้นตัวคั่น CNFs/WC สามารถช่วยให้ประสิทธิภาพการขนส่งประจุสูงขึ้น ตามที่ทดสอบโดย EIS ดังแสดงในรูปที่ 56(ค)



รูปที่ 57 (ก) ความหนาตัวคั่น CNFs และ(ข) ความหนาตัวคั่น CNFs/WC



รูปที่ 58 รูปภาพ SEM เพื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ (รูปที่อยู่ด้านในคือ แกนการกระจายของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์แต่ละเส้นผ่านศูนย์กลาง)



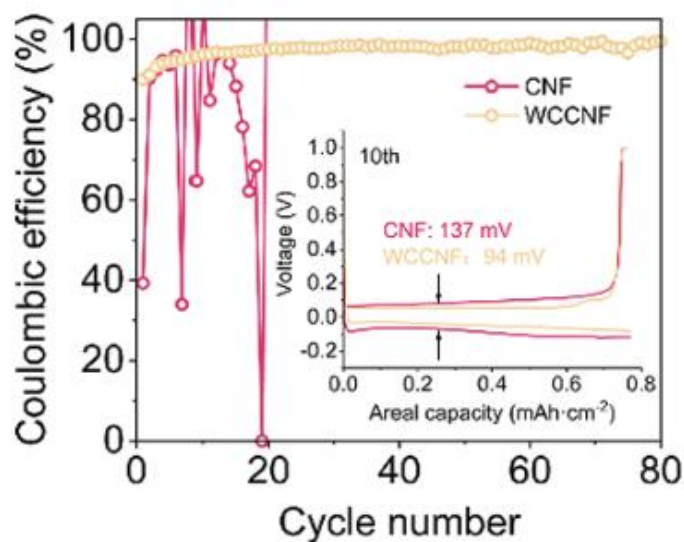
รูปที่ 59 รูปภาพ SEM (ก) ตัวคั่น CNFs และ(ข) ตัวคั่น CNFs/WC

ตัวคั่น CNFs/WC นั้นถูกเตรียมโดยวิธีการอย่างง่าย โดยใช้ส่วนผสมของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์และเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 57(ก) การเติมอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ลงในเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์จะทำให้ตัวคั่นเพิ่มความหนาขึ้นเล็กน้อยเป็น 70 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับตัวคั่น CNFs ที่มีความหนา 60 ไมโครเมตร โดยแสดงในรูปที่ 57(ข) หลังจากผ่านการพับและคลี่ตัวคั่น CNFs/WC ไม่พบรอยพับและการแตกหัก ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีและมีความเสถียรทาง

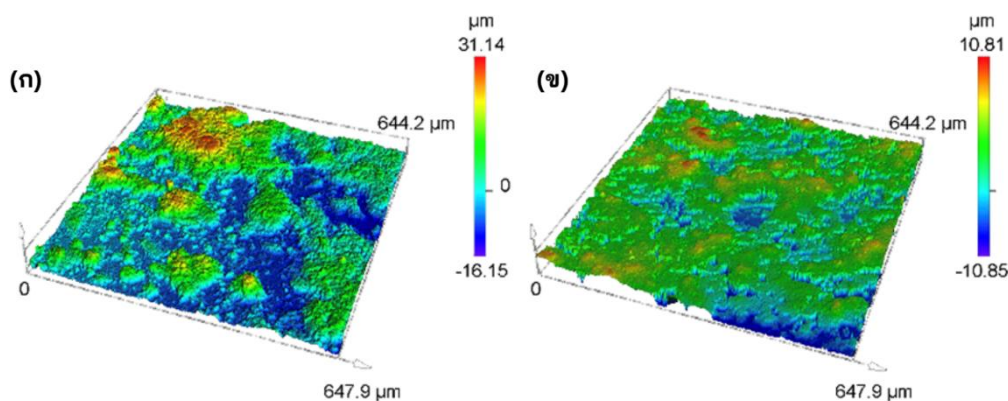
โครงสร้าง ดังที่เห็นได้จากรูปภาพ SEM ที่แสดงในรูปที่ 58 โดยอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 0.3 ถึง 1.2 ไมโครเมตร จากรูปภาพ SEM รูปที่ 59(ก) ของตัวคั่น CNFs แสดงโครงสร้างที่หลวมกว่าและมีรูพรุนที่มาก ในขณะที่ตัวคั่น CNFs/WC จะมีขนาดรูพรุนกะทัดรัดมากขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์เข้าไปในรูพรุนระหว่างเซลล์ูโลสนาโนไฟเบอร์ ตามรูปที่ 59(ข)

4.2 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม (Zn||Ti batteries)

อีกวิธีการทดสอบหนึ่งที่สามารถยืนยันถึงประสิทธิภาพที่เยี่ยมยอดของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ และลักษณะการสะสมของสังกะสีใหม่บนขั้วแอโนดระหว่างการใช้งาน คือการทดสอบแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม (Zn||Ti) เพื่อทดสอบหาความสามารถในการย้อนกลับได้ของสังกะสีไอออนโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC ที่มีปริมาณทังสเตนคาร์ไบด์ 0.1 กรัม และแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs เช่นเดียวกับการทดสอบในแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร



รูปที่ 60 ประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุ (Coulombic efficiency) ของแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม



รูปที่ 61 ภาพกล้องจุลทรรศน์เลเซอร์คอนโฟคอล (Laser confocal microscopy) ของแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม (Zn||Ti) โดยใช้ (ก) ตัวคั่น CNFs หลังจากผ่านการใช้งาน และ (ข) ตัวคั่น CNFs/WC หลังจากผ่านการใช้งาน

รูปที่ 60 แสดงประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุของแบตเตอรี่สังกะสี-ไทเทเนียม ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC จะแสดงประสิทธิภาพการอัด-คายประจุที่เสถียรมากยิ่งขึ้น โดยมีประสิทธิภาพที่ 98.7% หลังจากผ่านการใช้งานที่ 80 รอบ ในขณะที่ตัวคั่น CNFs มีความผันผวนอย่างรุนแรงหลังจากผ่านการใช้งานไปเพียงไม่กี่รอบ เนื่องจากความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนบนพื้นผิวที่ต่ำ, ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดจากน้ำ และการเติบโตของเดนไดรต์สังกะสีบนพื้นผิวแอโนดสังกะสี

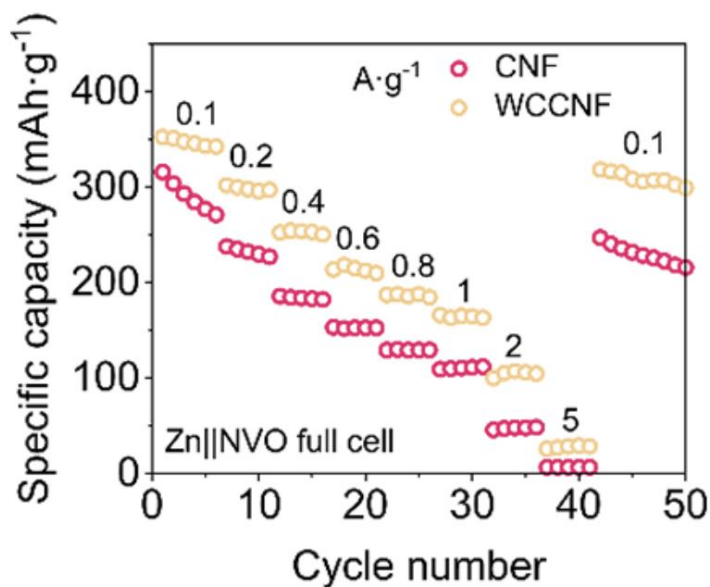
สัณฐานวิทยาของพื้นผิวของแอโนดสังกะสี หลังจากผ่านการใช้งานด้วยกล้องจุลทรรศน์เลเซอร์คอนโฟคอล ดังแสดงในรูปที่ 61(ก) ชั้นแอโนดสังกะสีในแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs เกิดเดนไดรต์สังกะสีจำนวนมาก ซึ่งเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถเจาะทะลุตัวคั่นจนทำให้แบตเตอรี่เกิดการลัดวงจร และทำให้เกิดความผันผวนของประสิทธิภาพการอัด-คายประจุ ในทางตรงกันข้ามการใช้ตัวคั่น CNFs/WC สามารถสร้างชั้นสังกะสีที่มีลักษณะแบนสม่ำเสมอบนชั้นแอโนดสังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 61(ข) ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวคั่น CNFs/WC สามารถเร่งการสะสมของสังกะสีที่สม่ำเสมอมากขึ้นและสามารถปรับปรุงความสามารถในการย้อนกลับของการชุบ/ลอกสังกะสีได้

4.3 การทดสอบแบตเตอรี่สังกะสี-NVO (Zn|| NVO full batteries)

ถึงแม้ว่าจะทราบถึงความสำเร็จในการแก้ไขปัญหาเรื่องยืดอายุการใช้งานของแอโนดสังกะสี และการเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี แต่ก็มีคามจำเป็นที่ต้องทดสอบว่าตัวตัวคั่น CNFs/WC จะสามารถทำงานได้ดีหรือไม่เมื่อนำไปใช้งานจริง โดยการประกอบแบตเตอรี่สังกะสี-NVO จากนั้นทำการทดสอบต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวตัวคั่น CNFs เพื่อเน้นย้ำถึงอิทธิพลเชิงบวกของอนุภาคทังสเทนคาร์ไบด์ในการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ชนิดสังกะสีไอออน ซึ่ง NVO ถูกใช้เป็นวัสดุแคโทด โดยส่วนประกอบของแบตเตอรี่ในแต่ละส่วนจะแสดงดังรูปที่ 62 และผลการทดสอบต่างๆจะถูกกล่าวต่อไป

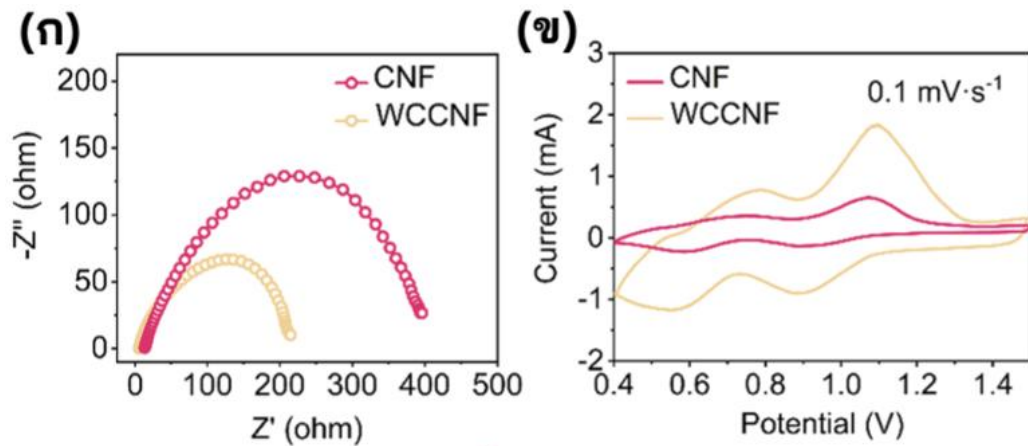


รูปที่ 62 แบบจำลองแบตเตอรี่สังกะสี-NVO (Zn|| NVO battery) ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC



รูปที่ 63 ค่าประสิทธิภาพที่ทดสอบที่ความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 0.1 แอมป์ต่อกรัม ถึง 5 แอมป์ต่อกรัม

ผลจากการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพ ที่ทำการทดสอบที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆตั้งแต่ 0.1 แอมป์ต่อกรัม ถึง 5 แอมป์ต่อกรัม ดังแสดงในรูปที่ 63 ค่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ Zn||NVO โดยใช้ CNFs เป็นตัวค้นแสดงค่าที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสขึ้นเป็น 5 แอมป์ต่อกรัม และความจุจะลดลงอย่างมากเมื่อความหนาแน่นกระแสกลับมาที่ 0.1 แอมป์ต่อกรัม (การรักษาความจุที่ 80.1%) ในทางตรงกันข้าม แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวค้น CNFs/WC แสดงความจุที่สูงขึ้นตามความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้น และสามารถรักษาความจุที่ดีเยี่ยมที่ 92.0% เมื่อความหนาแน่นกระแสกลับมาที่ 0.1 แอมป์ต่อกรัม เนื่องจากตัวค้น CNFs/WC สามารถลดความต้านทานของแบตเตอรี่ (Battery resistance) ซึ่งทำให้การถ่ายโอนประจุในแบตเตอรี่มีความคล่องตัว และรวดเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยทำให้การสูญเสียพลังงานมีค่าที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวค้น CNFs ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า ในรูปที่ 64(ก)



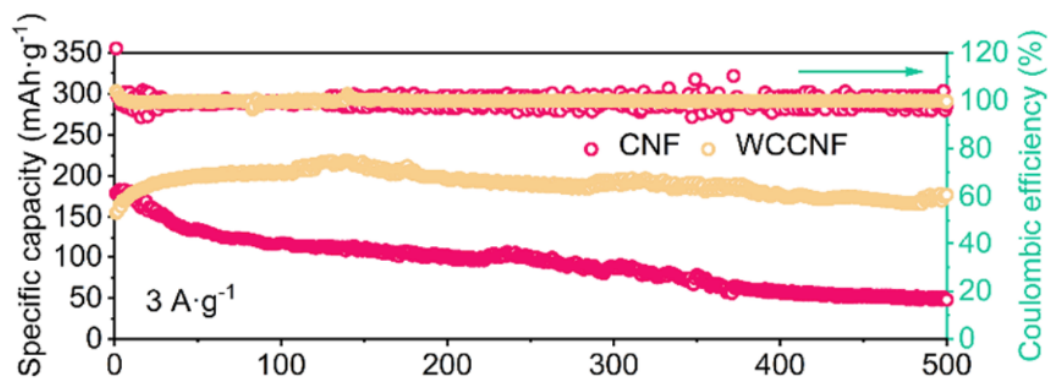
รูปที่ 64 ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่ Zn||NVO ระหว่างตัวคั่น CNFs และ CNFs/WC

(ก) การเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า และ

(ข) ไซคลิกโวลแทมเมตรี (CV curves) ที่อัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลต์ต่อนาที

แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC ให้ค่าจลนศาสตร์ความสามารถในการถ่ายโอนประจุที่เร็วขึ้น และการสูญเสียพลังงานที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs จากผลการทดสอบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 64(ก) ในทางกลับกันผลการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมตรีของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC แสดงความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้นและพื้นที่รีดอกซ์พีค (Redox peak) ที่ใหญ่กว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs ดังแสดงในรูปที่ 64(ข) ซึ่งให้เห็นถึงปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้น

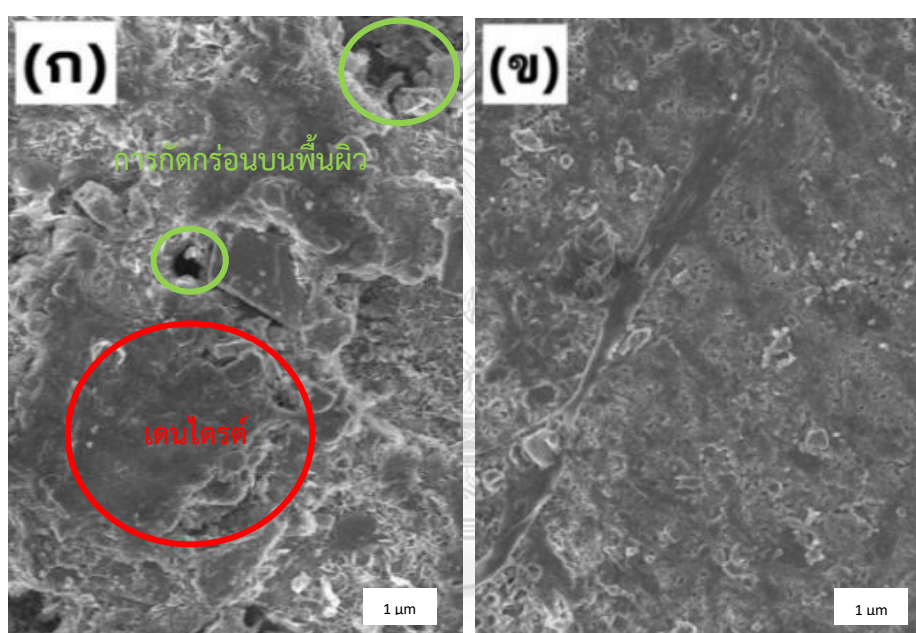
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 65 ความสามารถในการวนซ้ำระยะยาว (Long-term cyclability) ของแบตเตอรี่ Zn||NVO ที่

ใช้ตัวคั่นที่แตกต่างกัน ที่ความหนาแน่นกระแส 3 แอมป์ต่อกรัม

จากภาพที่ 65 แสดงให้เห็นว่าตัวคั่น CNFs/WC มีประสิทธิภาพการวนซ้ำในระยะยาวที่เสถียรยิ่งขึ้น ด้วยความสามารถในการจ่ายกระแสไฟ 132 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม และการเก็บรักษาความจุที่ 85.2% หลังจาก 500 รอบ ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 3 แอมป์ต่อกรัม ในขณะที่แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs แสดงความจุที่ลดลงอย่างรวดเร็วเป็น 30 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม หลังจากผ่านการใช้งาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการย้อนกลับได้และความทนทานของแบตเตอรี่ชนิดนี้อันเนื่องมาจากตัวคั่น CNFs/WC



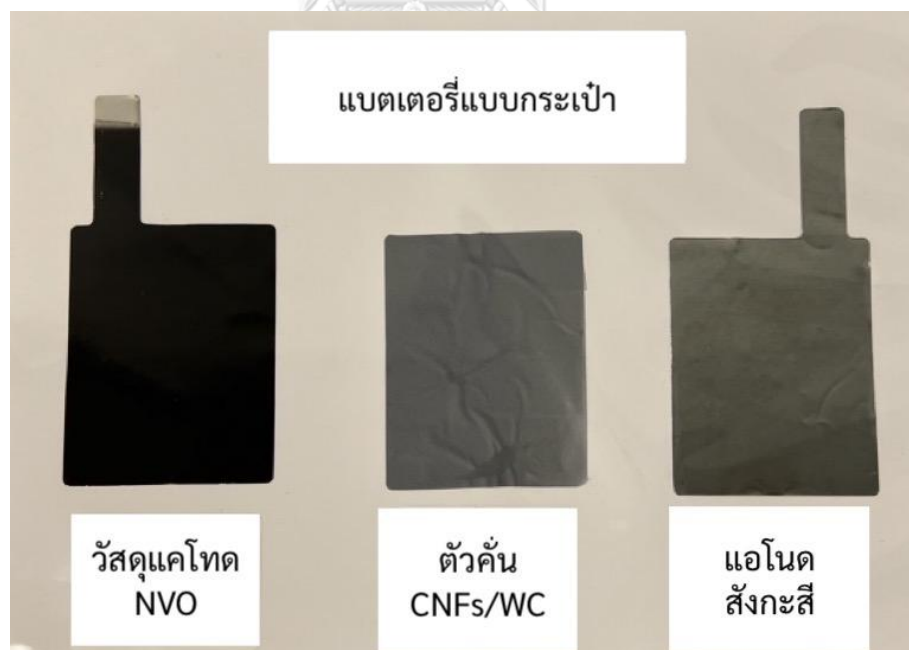
รูปที่ 66 รูปภาพ SEM ของขั้วแอโนดสังกะหลังจากการทดสอบความสามารถในการวนซ้ำของแบตเตอรี่ที่ใช้ (ก) ตัวคั่น CNFs และ(ข) ตัวคั่น CNFs/WC

จากการวิเคราะห์ขั้วแอโนดสังกะหลังจากการทดสอบความสามารถในการวนซ้ำ ดังรูปที่ 66(ก) แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs แสดงการเติบโตของเดนไดรต์สังกะสี และการกัดกร่อนของพื้นผิวที่รุนแรง ซึ่งขัดขวางการขนส่งประจุและทำลายความสามารถในการวนซ้ำของขั้วแอโนดสังกะสี จากการเปรียบเทียบขั้วแอโนดสังกะสีของแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs และแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC จะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC สามารถรักษาสัญญาณวิทยาของพื้นผิวเรียกว่า ดังแสดงในรูปที่ 66(ข)

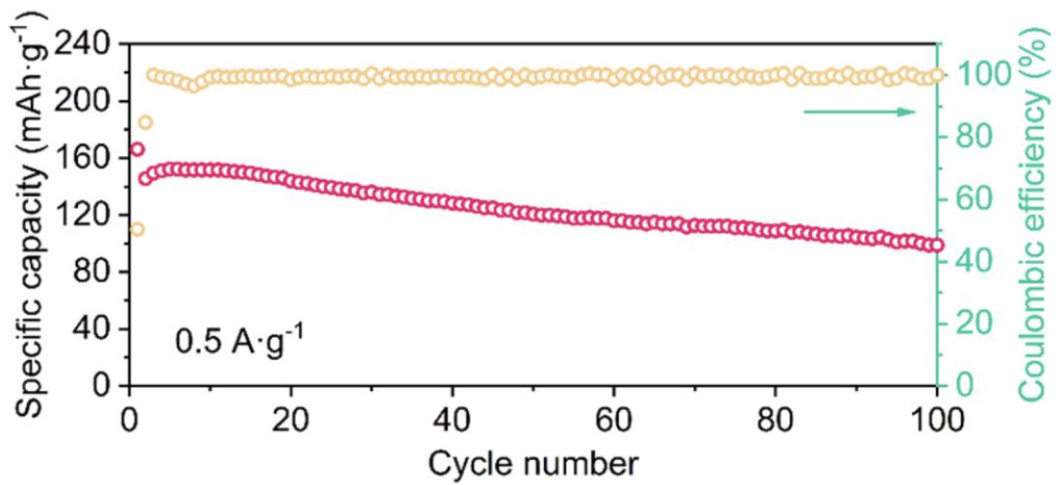
4.4 การทดสอบแบตเตอรี่ Zn||NVO แบบกระเป๋ (Pouch cell)



รูปที่ 67 แบตเตอรี่ Zn||NVO แบบกระเป๋ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC



รูปที่ 68 รูปภาพส่วนประกอบของแบตเตอรี่ Zn||NVO แบบกระเป๋ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC



รูปที่ 69 ประสิทธิภาพการวนซ้ำระยะยาวของแบตเตอรี่แบบกระเปาะที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC



รูปที่ 70 แบตเตอรี่ Zn||NVO แบบกระเปาะที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC พร้อมแรงดันไฟฟ้าภายใต้สถานะต่างๆ

แบตเตอรี่แบบกระเปาะ Zn||NVO ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC (รูปที่ 67) ได้รับการประกอบขึ้นโดยมีส่วนประกอบดังรูปที่ 68 เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้เพิ่มเติมของการใช้งานจริงของตัวคั่น CNFs/WC ในขนาดหน่วยที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าที่เสถียรที่ 1.25 โวลต์ แม้หลังจากผ่านการพับและคืนสภาพ ด้วยคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่ยอดเยี่ยมและความแข็งแรง

เชิงกลที่ดี และแสดงความสามารถในการรวนซ้ำระยะยาวแบตเตอรี่แบบกระเปาะ Zn||NVO ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC โดยมีมวลของวัสดุแคโทด NVO มีความสามารถในการอัด-คายประจุสูงที่ 121.6 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม โดยสามารถเก็บรักษาความจุที่สูงที่ 84.4% หลังจากการรวนซ้ำ 50 รอบ ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 แอมป์ต่อกรัม ดังแสดงในรูปที่ 69 ยิ่งไปกว่านั้นแบตเตอรี่แบบกระเปาะประกอบเข้าด้วยกันสามชั้นแบบอนุกรม สามารถให้ความสว่างหลอดไฟไดโอดจำนวน 20 ดวง แสดงในรูปที่ 70 ผลลัพธ์ข้างต้นบ่งชี้ว่าตัวคั่น CNFs/WC นี้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาแบตเตอรี่สังกะสีไอออนชนิดน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง มีต้นทุนต่ำ และมีความยืดหยุ่น



บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอสรุปผลการทดลอง ที่ได้ทำการพัฒนาตัวค้นเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ผสมอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพวัสดุขั้วแอโนดสังกะสีให้มีความเสถียรทางกายภาพและทางเคมี โดยอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดเล็กๆ ที่กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอภายในตัวค้น สามารถบรรลุผลสำเร็จในการทำให้วัสดุแอโนดสังกะสีมีความเสถียรที่สูงขึ้นและส่งผลให้ช่วยยับยั้งการเกิดเดนไดรต์สังกะสีบนขั้วแอโนด โดยจากบทก่อนหน้าได้กล่าวถึงผลการทดลองอย่างครอบคลุมและการอภิปรายผลการทดลองต่างๆนั้น แสดงให้เห็นชัดเจนว่าอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์สามารถกระตุ้นให้เกิดการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ (Electric field distribution) บนพื้นผิวของวัสดุแอโนดสังกะสี อีกทั้งพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ และสังกะสีไอออนที่มีค่าสูง ส่งผลให้พฤติกรรมการชุบ/ลอก (Plating/stripping behavior) ของสังกะสีไอออนบนขั้วแอโนดนั้นเป็นไปอย่างยอดเยี่ยมและมีการพอกตัวบนผิวขั้วแอโนดสังกะสีที่สม่ำเสมอ ลดการเกิดศักย์ไฟฟ้าเกิน และสามารถลดความต้านทานการส่งถ่ายประจุ (Charge transfer resistance) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ สามารถช่วยสนับสนุนคุณสมบัติทางจลนพลศาสตร์ (Reaction kinetics) ของปฏิกิริยาบนพื้นผิววัสดุแอโนดสังกะสีที่มากขึ้น และมากกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวค้นเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ไม่ได้ผสมอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์

โดยสรุปตัวค้น CNFs/WC มีคุณสมบัติต่างๆ ทั้งเรื่องความแข็งแรงทางกลที่สูงและต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากถูกเตรียมผ่านกระบวนการที่ง่าย เพื่อให้ได้แบตเตอรี่สังกะสีไอออนที่มีความเสถียรและประสิทธิภาพสูง สามารถลดศักย์ภาพนิเวศของสังกะสีที่มากเกินไปได้ ยับยั้งการกัดกร่อนของพื้นผิว ลดการเกิดพื้นผิวที่ขัดขวางการถ่ายเทประจุ ส่งเสริมการชุบ/ลอกสังกะสีแบบย้อนกลับได้ตามที่แสดงในผลการทดลอง

5.1.1 การทดสอบเพื่อหาปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่สุด
 ตารางที่ 6 ผลการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ชนิดตัวค้น		อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)	ค่าความต่างศักย์เกิน (มิลลิโวลต์)
ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ (กรัม)	ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบต์ (กรัม)		
15	0.1	27	166
20	0.1	1,200	92
25	0.1	10	303

จากตารางที่ 6 ผลการทดสอบชิ้นงานแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบต์เป็นตัวแปรควบคุมที่ 0.1 กรัม ภายใต้ความหนาแน่น 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ได้ผลสรุปว่าปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ 20 กรัม ให้อายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดถึง 1,200 ชั่วโมง และมีค่าความต่างศักย์เกินที่ 92 มิลลิโวลต์ ซึ่งจากค่าความต่างศักย์เกินที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ นี้ สามารถบอกได้ว่า ปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ 20 กรัมมีความสามารถในการถ่ายเทประจุที่เหนือกว่า เนื่องจากค่าความต้านทานการถ่ายเทประจุที่ต่ำกว่า จึงนำปริมาณเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์ที่ 20 กรัม มาเพื่อทดสอบหาปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบต์ที่เหมาะสมในขั้นตอนต่อไป

5.1.2 การทดสอบเพื่อหาปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ชนิดตัวค้น		อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)
ปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (กรัม)	ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ (กรัม)	
20	0	60
20	0.025	75
20	0.05	790
20	0.10	1,200
20	0.15	1,000
20	0.20	450
20	0.25	270

จากตารางที่ 7 ผลการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สังกะสีแบบสมมาตร ที่ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวค้นที่ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 0.1 กรัม (เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม) สามารถให้อายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดที่ 1,200 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ในตารางที่ 6 แต่จะเห็นว่าปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ 0.05 และ 0.15 กรัมก็สามารถให้อายุการใช้งานที่ยาวนานเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนด โดยทำการทดสอบที่ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ 3 ปริมาณ คือ 0.05, 0.10 และ 0.15 กรัม

ตารางที่ 8 ค่าศักยภาพนิวเคลียสของสังกะสีที่มากเกินไปของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนดสังกะสี

ชนิดตัวค้น		ค่าศักยภาพนิวเคลียสของสังกะสีที่มากเกินไป (มิลลิโวลต์)
ปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (กรัม)	ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ (กรัม)	
20	0.05	111
20	0.10	95
20	0.15	100

โดยผลการทดลองในตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ 0.10 กรัม มีค่าศักยภาพนิวเคลียสของสังกะสีที่มากเกินไปของการสะสมสังกะสีบนขั้วแอโนด 95 มิลลิโวลต์ ซึ่งน้อยกว่า แบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC0.05 กรัม (111 มิลลิโวลต์) และแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC0.15 กรัม (100 มิลลิโวลต์) โดยจะเห็นได้ว่าการรวมอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์เข้ากับ เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ แสดงการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของนิวเคลียสสังกะสีที่มีศักยภาพมากเกินไป สามารถบ่งชี้ได้ว่าอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์สามารถปรับปรุงจลนพลศาสตร์ของนิวเคลียสสังกะสี และสามารถเร่งการเกิดนิวเคลียสที่สม่ำเสมอ

จากอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดที่ 1,200 ชั่วโมง และมีค่าความต่างศักย์เกินต่ำที่สุดที่ 92 มิลลิโวลต์ ของแบตเตอรี่ตัวคั่นที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ 0.10 กรัม ดังนั้น จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาวิเคราะห์และทดสอบด้วยกระบวนการอื่นๆ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับตัวคั่นที่ไม่ได้ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นต่อไป โดยแทนตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ ว่าตัวคั่น CNFs/WC และแทนตัวคั่นที่มีปริมาณเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ 20 กรัม ว่าตัวคั่น CNFs

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สมมาตรภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 และ 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ชนิดของตัวคั่น	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)	
	ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
ตัวคั่น CNFs	70	50
ตัวคั่น CNFs/WC	1,200	1,000

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่สมมาตรภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 และ 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ชนิดของตัวคั่น	ค่าความต่างศักย์ (มิลลิโวลต์)	
	ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	ภายใต้ความหนาแน่นกระแส 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
ตัวคั่น CNFs	184	137
ตัวคั่น CNFs/WC	92	110

จากตารางที่ 9 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC ให้อายุการใช้งานที่ดีเยี่ยมถึง 1,200 ชั่วโมง ที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ 1,000 ชั่วโมงที่ความหนาแน่นกระแส 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตัวคั่น CNFs (70 ชั่วโมงที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ 50 ชั่วโมงที่ความหนาแน่นกระแส 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) ผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่สมมาตรจากตารางที่ 10 ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่สมมาตรที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC มีค่า 110 มิลลิโวลต์ ซึ่งต่ำกว่าตัวคั่น CNFs (137 มิลลิโวลต์) จากค่าความต่างศักย์ที่ต่ำกว่านี้ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทประจุที่ดีกว่า

ยิ่งไปกว่านั้นแบตเตอรี่แบบ ที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC มีความสามารถในการหมุนเวียนและมีความเสถียรสูง ด้วยประสิทธิภาพการอัด-คายประจุที่ 132 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม และสามารถรักษาประสิทธิภาพที่ 85.2% หลังจากผ่านไป 500 รอบ ที่ความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมป์ต่อกรัม ในขณะที่แบตเตอรี่แบบ Zn||NVO ที่ใช้ตัวคั่น CNFs แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แบตเตอรี่แบบที่ใช้ตัวคั่น CNFs/WC ยังมีประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุสูงถึง 121.6 มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม ด้วยการรักษาประสิทธิภาพที่ 84.4% หลังจากผ่านไป 50 รอบที่ความ ตามตารางที่ 11 ดังนั้นตัวคั่น CNFs/WC ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นนี้ จึงเป็นตัวคั่นที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ, มีความเสถียรสูง และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับข้อแวนโตนดสังกะสีที่ปราศจากเดนไดรต์ จึงสามารถพัฒนาเพื่อเป็นตัวเลือกสำหรับตัวคั่นที่มีศักยภาพและประสิทธิภาพสูงในเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในการทดสอบโพรไฟล์แรงดันไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทดสอบเพียงภายใต้ความหนาแน่นกระแส 1 และ 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จึงทำให้ยังไม่ทราบผลการทดสอบภายใต้ความหนาแน่นกระแสที่มากกว่า 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เพื่อให้ทราบเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของแบตเตอรี่หากรับความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้น
- สำหรับการใช้งานจริงของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน ตัวคั่นที่ดีควรมีคุณสมบัติของกระบวนการสังเคราะห์ที่สะดวก มีต้นทุนต่ำ และมีคุณสมบัติทางกลที่สูง

บรรณานุกรม

- [1] G. Li, Y. Jin, M.W. Akram, X. Chen, Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 (2017) 440-458.
- [2] S. Kelly-Richards, N. Silber-Coats, A. Crootof, D. Tecklin, C. Bauer, Governing the transition to renewable energy: A review of impacts and policy issues in the small hydropower boom, *Energy Policy*, 101 (2017) 251-264.
- [3] S.-B. Lai, M.-I. Jamesh, X.-C. Wu, Y.-L. Dong, J.-H. Wang, M. Gao, J.-F. Liu, X.-M. Sun, A promising energy storage system: rechargeable Ni–Zn battery, *Rare Metals*, 36 (2017) 381-396.
- [4] R. Mihigo, J. Okeibunor, H. O'malley, B. Masresha, P. Mkanda, F.J.V. Zawaira, Investing in life saving vaccines to guarantee life of future generations in Africa, 34 (2016) 5827-5832.
- [5] F. Torabi, P. Ahmadi, *Simulation of battery systems: Fundamentals and applications*, Academic Press 2019.
- [6] J.M. Tarascon, M. Armand, Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *Nature*, 414 (2001) 359-367.
- [7] M. Armand, J.M. Tarascon, Building better batteries, *Nature*, 451 (2008) 652-657.
- [8] A. Konarov, N. Voronina, J.H. Jo, Z. Bakenov, Y.-K. Sun, S.-T. Myung, Present and Future Perspective on Electrode Materials for Rechargeable Zinc-Ion Batteries, *ACS Energy Letters*, 3 (2018) 2620-2640.
- [9] G. Fang, J. Zhou, A. Pan, S. Liang, Recent Advances in Aqueous Zinc-Ion Batteries, *ACS Energy Letters*, 3 (2018) 2480-2501.
- [10] F. Wang, O. Borodin, T. Gao, X. Fan, W. Sun, F. Han, A. Faraone, J.A. Dura, K. Xu, C. Wang, Highly reversible zinc metal anode for aqueous batteries, *Nature Materials*, 17 (2018) 543-549.
- [11] J. Cao, D. Zhang, X. Zhang, M. Sawangphruk, J. Qin, R.J.J.o.M.C.A. Liu, A universal and facile approach to suppress dendrite formation for a Zn and Li metal anode, 8 (2020) 9331-9344.
- [12] M. Cheng, S.S. Sami, J. Wu, Benefits of using virtual energy storage system for power system frequency response, *Applied Energy*, 194 (2017) 376-385.

- [13] B. Bolund, H. Bernhoff, M. Leijon, Flywheel energy and power storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007) 235-258.
- [14] S. Rehman, L.M. Al-Hadhrami, M.M. Alam, Pumped hydro energy storage system: A technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44 (2015) 586-598.
- [15] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, D.G. Dorrell, A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2018) 1868-1878.
- [16] Q. Yang, G. Liang, Y. Guo, Z. Liu, B. Yan, D. Wang, Z. Huang, X. Li, J. Fan, C.J.A.m. Zhi, Do zinc dendrites exist in neutral zinc batteries: a developed electrohealing strategy to in situ rescue in-service batteries, 31 (2019) 1903778.
- [17] J. Cao, D. Zhang, Y. Yue, X. Wang, A. Sriksaow, C. Sriprachuabwong, A. Tuantranont, X. Zhang, Z.-S. Wu, J. Qin, Strongly coupled tungsten oxide/carbide heterogeneous hybrid for ultrastable aqueous rocking-chair zinc-ion batteries, *Chemical Engineering Journal*, 426 (2021) 131893.
- [18] J. Abdulla, J. Cao, D. Zhang, X. Zhang, C. Sriprachuabwong, S. Kheawhom, P. Wangyao, J. Qin, Elimination of Zinc Dendrites by Graphene Oxide Electrolyte Additive for Zinc-Ion Batteries, *ACS Applied Energy Materials*, 4 (2021) 4602-4609.
- [19] Z. Li, L. Ye, G. Zhou, W. Xu, K. Zhao, X. Zhang, S. Hong, T. Ma, M.-C. Li, C. Liu, C. Mei, A water-gating and zinc-sieving lignocellulose nanofiber separator for dendrite-free rechargeable aqueous zinc ion battery, *Chemical Engineering Journal*, 457 (2023) 141160.
- [20] X. Yin, J. Feng, Y. Chen, J. Zhang, F. Wu, W. Liu, W. Shi, X. Cao, Advanced separator engineering strategies for reversible electrochemical zinc storage, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 27 (2023) 1329-1344.
- [21] Z. Feng, J. Sun, Y. Liu, H. Jiang, T. Hu, M. Cui, F. Tian, C. Meng, Y. Zhang, Polypyrrole-intercalation tuning lamellar structure of $V_2O_5 \cdot nH_2O$ boosts fast zinc-ion kinetics for aqueous zinc-ion battery, *Journal of Power Sources*, 536 (2022) 231489.
- [22] Z. Feng, Y. Zhang, J. Sun, Y. Liu, H. Jiang, M. Cui, T. Hu, C. Meng, Dual ions enable vanadium oxide hydration with superior Zn^{2+} storage for aqueous zinc-ion batteries, *Chemical Engineering Journal*, 433 (2022) 133795.
- [23] H. Jiang, W. Gong, Y. Zhang, X. Liu, M. Waqar, J. Sun, Y. Liu, X. Dong, C. Meng, Z.

- Pan, J. Wang, Quench-tailored Al-doped V₂O₅ nanomaterials for efficient aqueous zinc-ion batteries, *Journal of Energy Chemistry*, 70 (2022) 52-58.
- [24] Z. Cao, X. Zhu, D. Xu, P. Dong, M.O.L. Chee, X. Li, K. Zhu, M. Ye, J. Shen, Eliminating Zn dendrites by commercial cyanoacrylate adhesive for zinc ion battery, *Energy Storage Materials*, 36 (2021) 132-138.
- [25] P. He, J. Huang, Detrimental Effects of Surface Imperfections and Unpolished Edges on the Cycling Stability of a Zinc Foil Anode, *ACS Energy Letters*, 6 (2021) 1990-1995.
- [26] N. Zhang, S. Huang, Z. Yuan, J. Zhu, Z. Zhao, Z.J.A.C.I.E. Niu, Direct self-assembly of MXene on Zn anodes for dendrite-free aqueous zinc-ion batteries, 60 (2021) 2861-2865.
- [27] J. Hao, X. Li, S. Zhang, F. Yang, X. Zeng, S. Zhang, G. Bo, C. Wang, Z.J.A.F.M. Guo, Designing dendrite-free zinc anodes for advanced aqueous zinc batteries, 30 (2020) 2001263.
- [28] X. Xu, Y. Chen, D. Zheng, P. Ruan, Y. Cai, X. Dai, X. Niu, C. Pei, W. Shi, W.J.S. Liu, Ultra-Fast and Scalable Saline Immersion Strategy Enabling Uniform Zn Nucleation and Deposition for High-Performance Zn-Ion Batteries, 17 (2021) 2101901.
- [29] L. Wang, W. Huang, W. Guo, Z.H. Guo, C. Chang, L. Gao, X.J.A.F.M. Pu, Sn alloying to inhibit hydrogen evolution of Zn metal anode in rechargeable aqueous batteries, 32 (2022) 2108533.
- [30] F. Wu, Y. Chen, Y. Chen, R. Yin, Y. Feng, D. Zheng, X. Xu, W. Shi, W. Liu, X.J.S. Cao, Achieving Highly Reversible Zinc Anodes via N, N-Dimethylacetamide Enabled Zn-Ion Solvation Regulation, 18 (2022) 2202363.
- [31] Y. Yang, T. Chen, M. Zhu, G. Gao, Y. Wang, Q. Nie, Y. Jiang, T. Xiong, W.S.V. Lee, J. Xue, Regulating Dendrite-Free Zn Deposition by a Self-Assembled OH-Terminated SiO₂ Nanosphere Layer toward a Zn Metal Anode, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14 (2022) 37759-37770.
- [32] T. Nestler, R. Schmid, W. Münchgesang, V. Bazhenov, J. Schilm, T. Leisegang, D.C. Meyer, Separators-technology review: ceramic based separators for secondary batteries, AIP conference proceedings, American Institute of Physics, 2014, pp. 155-184.
- [33] S. Kim, X. Yang, K. Yang, H. Guo, M. Cho, Y.J. Kim, Y. Lee, Recycling respirator masks to a high-value product: From COVID-19 prevention to highly efficient battery separator, *Chemical Engineering Journal*, 430 (2022) 132723.

- [34] J. Cao, D. Zhang, C. Gu, X. Zhang, M. Okhawilai, S. Wang, J. Han, J. Qin, Y. Huang, Modulating Zn deposition via ceramic-cellulose separator with interfacial polarization effect for durable zinc anode, *Nano Energy*, 89 (2021) 106322.
- [35] Z. Wang, L. Dong, W. Huang, H. Jia, Q. Zhao, Y. Wang, B. Fei, F. Pan, Simultaneously Regulating Uniform Zn²⁺ Flux and Electron Conduction by MOF/rGO Interlayers for High-Performance Zn Anodes, *Nano-Micro Letters*, 13 (2021) 73.
- [36] L. Wu, X. Yao, Y. Liu, J. Ma, H. Zheng, X. Liang, Y. Sun, H. Xiang, A g-C₃N₄-coated paper-based separator for sodium metal batteries, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 25 (2021) 1373-1381.
- [37] Y. Zhang, X. Li, L. Fan, Y. Shuai, N. Zhang, Ultrathin and super-tough membrane for anti-dendrite separator in aqueous zinc-ion batteries, *Cell Reports Physical Science*, 3 (2022) 100824.
- [38] H. Lewis, P. Jackson, A. Salkind, T. Danko, R. Bell, Advanced membranes for alkaline primary and rechargeable alkaline cells with zinc anodes, *Journal of Power Sources*, 96 (2001) 128-132.
- [39] O. Javadi, A. Fathollahi Zonouz, M. Soltanieh, S.A. Mousavi, PVDF/PU blend membrane separator for lithium-ion batteries via non-solvent-induced phase separation (NIPS), *Journal of Solid State Electrochemistry*, 25 (2021) 2385-2394.
- [40] Y. Yin, S. Wang, Q. Zhang, Y. Song, N. Chang, Y. Pan, H. Zhang, X.J.A.M. Li, Dendrite-free zinc deposition induced by tin-modified multifunctional 3D host for stable zinc-based flow battery, *Journal of Power Sources*, 32 (2020) 1906803.
- [41] G. Li, Z. Liu, Q. Huang, Y. Gao, M. Regula, D. Wang, L.-Q. Chen, D.J.N.E. Wang, Stable metal battery anodes enabled by polyethylenimine sponge hosts by way of electrokinetic effects, *Journal of Power Sources*, 3 (2018) 1076-1083.
- [42] B. Wu, Y. Wu, Z. Lu, J. Zhang, N. Han, Y. Wang, X.-m. Li, M. Lin, L.J.J.o.M.C.A. Zeng, A cation selective separator induced cathode protective layer and regulated zinc deposition for zinc ion batteries, *Journal of Power Sources*, 9 (2021) 4734-4743.
- [43] Y. Cui, Q. Zhao, X. Wu, Z. Wang, R. Qin, Y. Wang, M. Liu, Y. Song, G. Qian, Z. Song, L. Yang, F. Pan, Quasi-solid single Zn-ion conductor with high conductivity enabling dendrite-free Zn metal anode, *Energy Storage Materials*, 27 (2020) 1-8.
- [44] B.-S. Lee, S. Cui, X. Xing, H. Liu, X. Yue, V. Petrova, H.-D. Lim, R. Chen, P. Liu,

Dendrite Suppression Membranes for Rechargeable Zinc Batteries, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10 (2018) 38928-38935.

[45] C. Li, Z. Sun, T. Yang, L. Yu, N. Wei, Z. Tian, J. Cai, J. Lv, Y. Shao, M.H.J.A.M. Rummeli, Directly grown vertical graphene carpets as janus separators toward stabilized Zn metal anodes, 32 (2020) 2003425.

[46] J. Cao, D. Zhang, C. Gu, X. Wang, S. Wang, X. Zhang, J. Qin, Z.S.J.A.E.M. Wu, Manipulating crystallographic orientation of zinc deposition for dendrite-free zinc ion batteries, 11 (2021) 2101299.

[47] Y. Zong, H. He, Y. Wang, M. Wu, X. Ren, Z. Bai, N. Wang, X. Ning, S.X.J.A.E.M. Dou, Functionalized Separator Strategies toward Advanced Aqueous Zinc-Ion Batteries, (2023) 2300403.

[48] L. Ma, M.A. Schroeder, O. Borodin, T.P. Pollard, M.S. Ding, C. Wang, K. Xu, Realizing high zinc reversibility in rechargeable batteries, *Nature Energy*, 5 (2020) 743-749.

[49] Z. Shen, Z. Tang, C. Li, L. Luo, J. Pu, Z. Wen, Y. Liu, Y. Ji, J. Xie, L.J.A.E.M. Wang, Precise proton redistribution for two-electron redox in aqueous zinc/manganese dioxide batteries, 11 (2021) 2102055.

[50] H. Karimi, M. Hadi, I. Ebrahimzadeh, M.R. Farhang, M. Sadeghi, High-temperature oxidation behaviour of WC-FeAl composite fabricated by spark plasma sintering, *Ceramics International*, 44 (2018) 17147-17153.

[51] Z. Károly, J. Szépvölgyi, Plasma spheroidization of ceramic particles, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44 (2005) 221-224.

[52] J. Cao, D. Zhang, Y. Yue, X. Wang, T. Pakornchote, T. Bovornratanaraks, X. Zhang, Z.-S. Wu, J. Qin, Oxygen defect enriched (NH₄)₂V₁₀O₂₅·8H₂O nanosheets for superior aqueous zinc-ion batteries, *Nano Energy*, 84 (2021) 105876.

[53] J. Abdulla, J. Cao, P. Wangyao, J. Qin, Review on the suppression of Zn dendrite for high performance of Zn ion battery, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 30 (2020).

[54] C. Yang, X. Zhang, J. Cao, D. Zhang, P. Kidkhunthod, S. Wannapaiboon, J. Qin, Interfacial Reconstruction for Regulating Zn²⁺ Deposition toward Ultrastable Zn Metal Anodes, *ACS applied materials & interfaces*, 15 (2023).

[55] Q. Yang, G. Liang, Y. Guo, Z. Liu, B. Yan, D. Wang, H. Zhaodong, X. Li, J. Fan, C. Zhi,

Do Zinc Dendrites Exist in Neutral Zinc Batteries: A Developed Electrohealing Strategy to In Situ Rescue In-Service Batteries, *Advanced Materials*, 31 (2019) 1903778.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภัทรพร วุฒาพาณิชย์
วัน เดือน ปี เกิด	6 เมษายน 2541
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น-ปลาย โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย จบศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปีการศึกษา 2564 ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เข้าศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต ปีการศึกษา 2564 สาขาวิชาวิศวกรรม และเทคโนโลยีเพื่อการป้องกันประเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	28 หมู่.2 ต.ห้วยขวาง อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
ผลงานตีพิมพ์	Inhibition of Zinc Dendrite Growth by WC-Cellulose Separators for High-Performance Zinc-Ion Batteries