บทความวิจัย

งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (TIchE2016)

ผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการงอกของสังกะสีบนแผ่นนิกเกิลโฟม

พีรยา สันติดำรงพันธุ์ และ ณัฐพร ชะบา
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์* และ อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
นวภัค เอื้ออนันต์
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08–1832–0382 อีเมล: sutasineene@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.03.004
รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2560 ตอบรับเมื่อ 30 สิงหาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 21 มีนาคม 2561
© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการชุบแผ่นนิกเกิลโฟมด้วยโลหะสังกะสีเป็นขั้วแอโนด เพื่อศึกษาผลการงอกของเดนไดรต์สังกะสีเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัน โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายซิงค์ซัลเฟตทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นตรวจสอบโครงร่างแผ่นอัดแน่นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ชุบสังกะสีโดยใช้กระแสไฟฟ้า 0.8 A และซิงค์ซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีการจัดเรียงตัวของเดนไดรต์สังกะสีเป็นแบบแผ่นอัดแน่น (Compact) ขั้วที่เตรียมได้มีความสามารถในการปล่อยประจุไฟฟ้าออกได้ดี สามารถทำงานได้ 210 รอบ เป็นเวลามากกว่า 5 ชั่วโมง

คำสำคัญ: แบตเตอรี่, ขั้วสังกะสี, นิกเกิลโฟม, การเกิดเดนไดรต์สังกะสี

การอ้างอิงบทความ: พีรยา สันติดำรงพันธุ์ ณัฐพร ชะบา สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์ อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ และ นวภัค เอื้ออนันต์, "ผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการงอกของสังกะสีบนแผ่นนิกเกิลโฟม," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 2, หน้า 383–390, เม.ย.–มิ.ย. 2561.

Research Article

The 26th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (TIChE2016)

Effects of Electrolytes on Zinc Deposition onto a Nickel Foam

Peeraya Santidamrongpan and Nattaporn Chaba

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

Sutasinee Neramittagapong* and Arthit Neramittagapong

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

Nawapak Eua-Anant

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08–1832–0382, E–mail: sutasineene@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.03.004

Received 1 June 2017; Accepted 30 August 2017; Published online: 21 March 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The electrodeposition of zinc on nickel foam was prepared to use as an anode. The effects of potassium hydroxide (KOH) or zinc sulfate ($ZnSO_4$) on the deposition of Zn dendrite at different current density were investigated. The morphology characterization of Zn dendrite was performed using *Scanning Electron Microscope* (*SEM*). The Zn anode prepared at the current density of 0.8A and using $ZnSO_4$ as electrolyte showed a good morphology called compact. It gave a specific discharge of 210 cycles for more than 5 hours.

Keywords: Battery, Zn Anode, Ni Foam, Dendrite

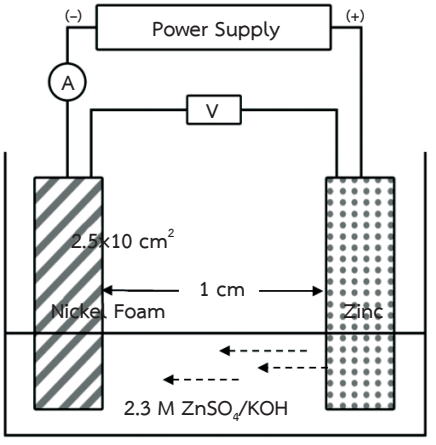
Please cite this article as: P. Santidamrongpan, N. Chaba, S. Neramittagapong, A. Neramittagapong, and N. Eua-Anant, "Effects of electrolytes on zinc deposition onto a nickel foam," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 2, pp. 383–390, Apr.–Jun. 2018 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันแบตเตอรี่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทำให้เกิดการอัดประจุซ้ำและมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งานและอัดประจุซ้ำอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการงอกของสังกะสีหรือที่เรียกกันว่าเดนไดรต์ (Dendrite) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ให้แบตเตอรี่เสื่อมคุณภาพและไม่สามารถใช้งานได้

ดังนั้นทั่วโลกได้มีการพัฒนาอุปกรณ์กักเก็บไฟฟ้า โดยที่ผ่านมามีการใช้งานแบตเตอรี่ที่มีส่วนผสมของสารพิษสูง เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีประสิทธิภาพการทำงาน และความปลอดภัยสูง ลดต้นทุนการผลิตและสามารถใช้พลังงานได้อย่างยั่งยืน นั้นคือ แบตเตอรี่สังกะสี-อากาศ (Zn-air Battery) [1]–[3] โดยใช้โลหะสังกะสีเป็นขั้วแคโทด เนื่องจากสังกะสีมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสูง สามารถหาได้ง่าย ให้พลังงานจำเพาะสูง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเมื่ออัดประจุซ้ำมีความปลอดภัยสูง ซึ่งข้อเสียที่เป็นปัญหาหลักของแบตเตอรี่ประเภทอัดประจุซ้ำ (Rechargeable) ที่พบมาก คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของโลหะเมื่ออัดประจุซ้ำอย่างต่อเนื่อง [1], [4] โดยลักษณะการงอกของโลหะที่มาเกาะแผ่นรองรับ จะเกิดเป็นโลหะสังกะสี (เดนไดรต์) ปลายแหลมยื่นออกจากแผ่นรองรับ โดยลักษณะการเกิดเดนไดรต์จะแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลต่อการงอกของสังกะสี เมื่อใช้สารละลายที่อยู่ในสภาวะเบสแก่จะมีอัตราการเกิดเดนไดรต์ได้มากกว่า [4]–[6] และมีการรายงานถึงวัสดุที่สามารถนำมาปรับปรุงการนำไฟฟ้า และการยึดเกาะได้ เช่น ฟรอยด์ ตาข่าย และโฟมที่ทำมาจากโลหะ แต่วัสดุที่เป็นโฟมนั้นมีความทนทานต่อสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้ [7], [8] และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของปี ค.ศ. 2015 พบว่ามีการใช้นิกเกิลไฮดรอกไซด์เป็นขั้วแคโทด แล้วทำให้ปริมาณความจุจำเพาะเพิ่มขึ้นและให้พลังงานการปล่อยประจุที่สูงขึ้น ส่งผลให้แบตเตอรี่ให้มีคุณสมบัติการทำงานที่ดีกว่าเดิม [9], [10] และพบว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของแผ่นรองรับสามารถลดอัตราการงอกของเดนไดรต์บนผิวนอกของวัสดุได้ ดังนั้นการเพิ่มผิวสัมผัสของแผ่นรองรับโดยให้แผ่นรองรับมีขนาดเท่าเดิม สามารถทำได้โดยการใช้วัสดุที่มีรูพรุนนั้นคือนิกเกิลโฟม โดยมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรง ทนไฟ เป็นรูพรุนสูง และมีความเสถียรทางสัณฐานวิทยา [11] จึงเป็นที่น่าสนใจนำมาใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1 ภาพจำลองการชุบขั้วแบตเตอรี่ (Electrodeposition)

ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีแนวคิดใช้แผ่นนิกเกิลโฟมเป็นวัสดุรองรับในการทำขั้วสังกะสีแอโนด (Zn Anode) และทำการศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายซิงค์ซัลเฟตและสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดเดนไดรต์บนเซลล์แบตเตอรี่ เพื่อลดปัญหามลพิษ เพิ่มความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดการเกิดเดนไดรต์ในแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมขั้ว Zn Anode

เตรียมแผ่นนิกเกิลโฟมขนาด 2.5×10 ซม. สำหรับใช้เป็นแผ่นรองรับที่ขั้วแอโนด เพื่อจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 2.3 โมลาร์ ซิงค์ซัลเฟต หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ดำเนินการชุบแผ่นนิกเกิลโฟม

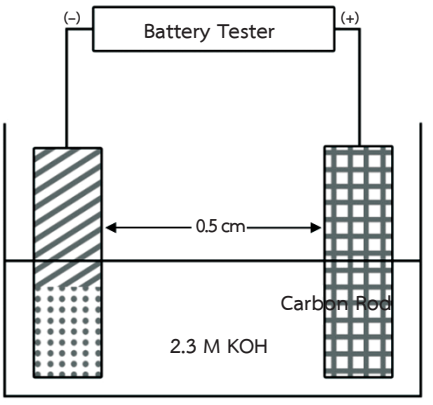
โดยใช้กระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องจ่ายไฟ (Power Supply) รุ่น GPC-3030D ด้วยกระแสไฟฟ้า 0.2, 0.8 และ 1.2 A ชุบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้งเก็บตัวอย่างให้ปลอดความชื้น

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของขั้ว

ตัดตัวอย่างให้มีขนาดไม่เกิน 1×1 ซม. จากนั้นนำตัวอย่างติดบนเทปกาวคาร์บอนที่ติดอยู่บนสตับ (Stub) ทำการฉาบด้วยทองคำบางๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ตรวจโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning ElectronMicroscope; SEM) รุ่น S-3000N

2.3 การตรวจสอบการทำงานของแบตเตอรี่

ทดสอบการทำงานแบตเตอรี่โดยเครื่อง LAND CT2001A Battery Tester แสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้ขั้วสังกะสีที่เตรียมได้เป็นขั้วแอโนด และใช้แท่งคาร์บอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ใช้เป็นขั้วมาตรฐานสำหรับขั้วแคโทด ปล่อยประจุไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



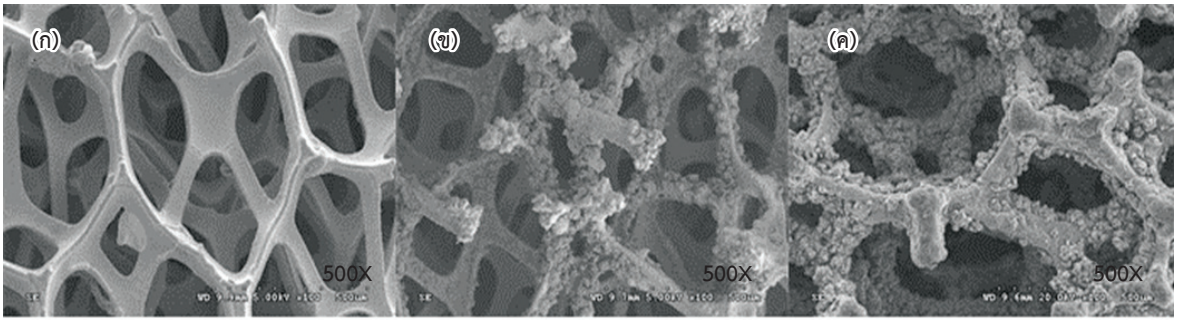
รูปที่ 2 ภาพจำลองการทดสอบการทำงานแบตเตอรี่ที่มีแท่งคาร์บอนเป็นขั้วแคโทดมาตรฐาน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

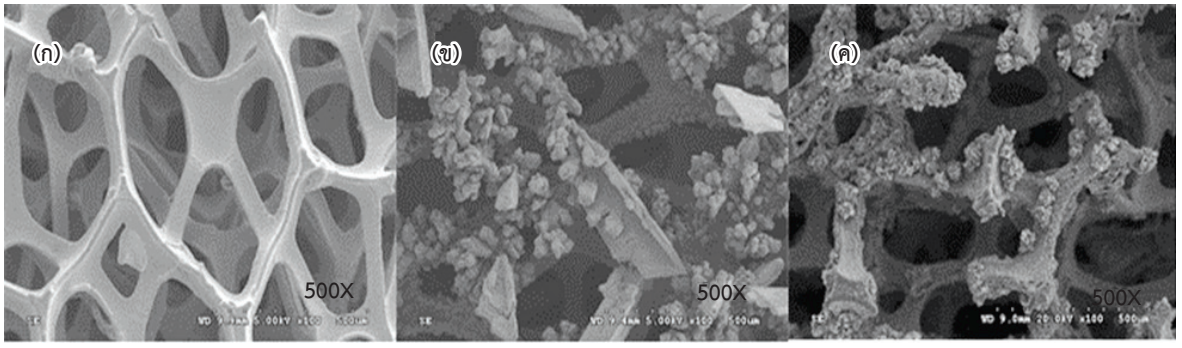
3.1 ผลการชุบโลหะสังกะสีบนแผ่นนิกเกิลโฟมเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน

3.1.1 ผลของการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 0.2 A

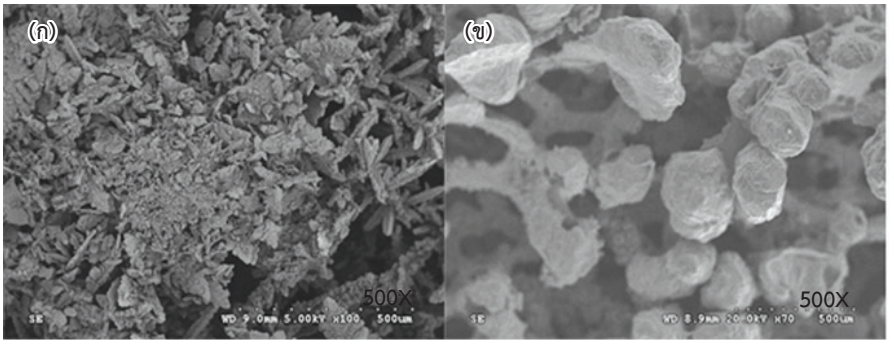
เมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นนิกเกิลที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ แสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [รูปที่ 3 (ข)] การเกาะของสังกะสีสามารถแทรกผ่านชั้นรูพรุนของแผ่นนิกเกิลโฟมได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3 (ก) โดยลักษณะเดนไดรต์เริ่มเป็นแผ่นอัดแน่นขนาดเล็กรวมกับเดนไดรต์แบบต้นมอสกระจัดกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่นนิกเกิลโฟม และส่วนใหญ่การเกาะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของแผ่นนิกเกิลโฟม แต่เมื่อใช้ซิงค์ซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [รูปที่ 3 (ค)] จะเห็นว่าสังกะสีสามารถแทรกผ่านชั้นรูพรุนของนิกเกิลโฟมโดยเกิดเดนไดรต์ลักษณะแบบต้นมอส



รูปที่ 3 สัณฐานวิทยาของนิกเกิลโฟม (×500X) (ก) แผ่นนิกเกิลโฟม (ข) แผ่นตัวอย่างที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ค) แผ่นตัวอย่างที่ใช้ซิงค์ซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่กระแสไฟฟ้า 0.2 A



รูปที่ 4 สัณฐานวิทยาของนิกเกิลโฟม (×500X) (ก) แผ่นนิกเกิลโฟม (ข) แผ่นตัวอย่างที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ค) แผ่นตัวอย่างที่ใช้ซิงค์ซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่กระแสไฟฟ้า 0.8 A



รูปที่ 5 สัณฐานวิทยาของนิกเกิลโฟม (×500X) (ก) แผ่นตัวอย่างที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ข) แผ่นตัวอย่างที่ใช้ซิงค์ซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่กระแสไฟฟ้า 1.2 A

ซึ่งเกาะบริเวณภายในชั้นรูพรุนเป็นส่วนใหญ่มากกว่าการเกาะที่พื้นผิวด้านนอก นั้นหมายถึงการเกิดการเกาะที่พื้นผิวด้านในรูพรุนส่งผลดีกับแบตเตอรี่มากกว่า

3.1.2 ผลของกระแสไฟฟ้า 0.8 A

เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้โลหะสังกะสีสามารถแทรกผ่านชั้นรูพรุนของแผ่นนิกเกิลโฟมได้ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4 จากภาพจะเห็นว่าเมื่อใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [รูปที่ 4 (ข)] โลหะสังกะสีเริ่มมีการเกาะแบบต่อยอดเป็นปลายแหลม การเกาะในลักษณะนี้ทำให้แบตเตอรี่ลัดวงจรได้ง่าย และเสื่อมสภาพเร็ว แต่เมื่อใช้สารละลายซิงค์ซัลเฟต จะพบว่าอัตราการเกาะของสังกะสีภายในชั้นรูพรุนของแผ่นนิกเกิลโฟมลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3 (ค) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการเกาะของสังกะสีในชั้นรูพรุนของนิกเกิลโฟมลดลง เกิดการเกาะของโลหะสังสีแบบแผ่นอัดแน่น (Compact)

3.1.3 ผลของการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 1.2 A

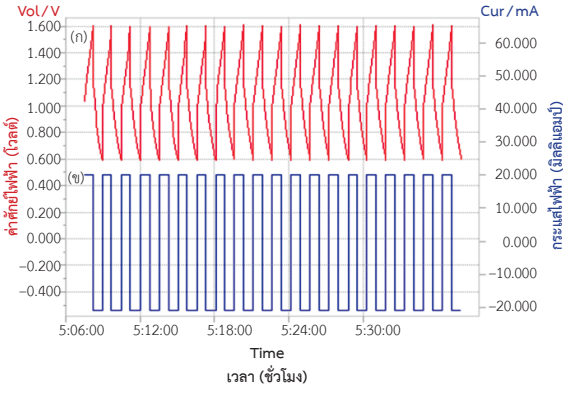
เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าขึ้น พฤติกรรมการเกิดเดนไดรต์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ที่แตกต่างดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเกิดเดนไดรต์ลักษณะเหมือนกันนั้นคือ เป็นแบบแผ่นอัดแน่นและแบบต้นมอสเหมือนกัน กระจายปกคลุมทั่วทั้งแผ่น โดยเมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เดนไดรต์จะมีลักษณะแบบต้นมอสเป็นส่วนใหญ่ และมีการเกิดในลักษณะต่อกันจนทำให้มีลักณะยอดแหลม [รูปที่ 5 (ก)] แต่เมื่อใช้สารละลายซิงค์ซัลเฟต เดนไดรต์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะแบบคล้ายดอกไม้ (Flower-like) และลักษณะยาวต่อกันเป็น

แท่งยื่นออกมาจากแผ่นนิกเกิลโฟมอย่างเห็นได้ชัด [รูปที่ 5 (ข)]

ผลของกระแสไฟฟ้าและชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อลักษณะการเกิดเดนไดรต์ได้สรุปรวมไว้ในตารางที่ 1

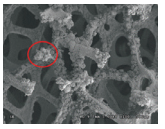
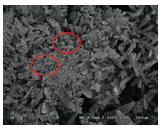
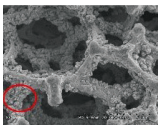
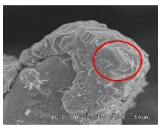
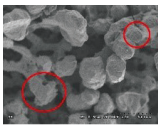
3.2 ผลการทดสอบขั้วแบตเตอรี่

เมื่อทำการอัดประจุเข้าและปล่อยประจุออกในแบบจำลองแบตเตอรี่ครึ่งเซลล์ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในแบตเตอรี่ทั่วไปในปัจจุบัน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 210 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 เซลล์แบตเตอรี่ยังสามารถทำงานโดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.6 โวลต์ และต่ำสุดที่ 0.6 โวลต์ โดยสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้มากกว่า 5 ชั่วโมง



รูปที่ 6 โปรไฟล์จำลองการทดสอบการทำงานของแบตเตอรี่ 1 เซลล์ เมื่อเทียบกับเวลา (ก) ค่าศักย์ไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ลักษณะเดนไดรต์และน้ำหนักสังกะสีบนแผ่นตัวอย่างเมื่อทำการชุบโลหะผ่านกระไฟฟ้า โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างกัน

อิเล็กโทรไลต์	กระแส (ก)	น้ำหนัก (g)	ลักษณะเดนไดรต์
KOH	0.2	0.18	 ต้นมอส
	0.8	0.81	แผ่นอัดแน่น (ปลายแหลม)
	1.2	1.07	 ต้นมอสและแผ่นอัดแน่น
ZnSO4	0.2	0.13	 ต้นมอส
	0.8	0.69	 แผ่นอัดแน่น
	1.2	0.87	 ต้นมอสและแผ่นอัดแน่น

4. สรุป

เมื่อใช้นิกเกิลโฟมเป็นวัสดุรองรับอาจช่วยลดการลัดวงจรไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ เนื่องจากความเป็นรูพรุนสูงของแผ่นนิกเกิลโฟมช่วยลดการเกิดเดนไดรต์ที่ผิวด้านนอกของวัสดุรองรับเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นทองแดงที่มีผิวเรียบ จากสัณฐานวิทยาการเกิดเดนไดรต์ขณะชุบโลหะสังกะสีนั้น พบว่าเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ซิงค์ซัลเฟต ด้วยกระแสไฟฟ้า 0.2 A การจัดเรียงตัวจะมีลักษณะแบบต้นมอสและจะมีความเป็นแผ่นอัดแน่นมากขึ้นเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งขั้วแอโนดที่มีโครงสร้างเดนไดรต์แบบแผ่นอัดแน่นนี้ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ เนื่องจากโครงสร้างเดนไดรต์แบบแผ่นอัดแน่นช่วยลดปัญหาการลัดวงจรในแบตเตอรี่ได้สูงกว่าเดนไดรต์ลักษณะแบบต้นมอส ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยค่าศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 1.6 โวลต์ ได้นานต่อเนื่องมากกว่า 5 ชั่วโมง และเมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่กระแสไฟฟ้าเดียวกันเริ่มมีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นอัดแน่นแต่มีปลายแหลมยื่นออกมาและลักษณะเดนไดรต์จะมีความเป็นระเบียบมากขึ้น โลหะสังกะสีจัดเรียงตัวเป็นแผ่นอัดแน่นมากยิ่งขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าสูงถึง 1.2 A ส่งผลให้โลหะสังกะสีเกาะวัสดุรองรับในปริมาณมากโดยเกิดเดนไดรต์ในลักษณะต้นมอสขึ้นปกคลุมในจำนวนมากทั่วทั้งแผ่นวัสดุรองรับ ทำให้เกิดเดนไดรต์ในลักษณะเป็นโลหะสังกะสียื่นเป็นปลายแหลมออกมา ซึ่งไม่เหมาะแก่การนำขั้วแอโนดในสภาวะนี้มาทำเป็นเซลล์แบตเตอรี่ เนื่องจากอาจทำให้เซลล์แบตเตอรี่เกิดการลัดวงจรได้อย่างง่ายดาย

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Pei, K. Wang, and Z. Ma, “Technologies for extending zinc–air battery’s cyclelife: A review,” *Applied Energy*, vol. 128, pp. 315–324, 2014.

[2] M. Xu, D. G. Lvey, Z. Xie, and W. Qu, “Rechargeable Zn-air batteries: Progress in electrolyte development and cell configuration advancement,” *Journal of Power Sources*, vol. 283, pp. 358–371, 2015.

[3] P.-C. Li, Y.-J. Chien, and C.-C. Hu, “Novel configuration of bifunctional air electrodes for rechargeable zinc–air batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 313, pp. 37–45, 2016.

[4] K. Wang, P. Pei, Z. Ma, H. Xu, P. Li, and X. Wang, “Morphology control of zinc regeneration for zinc–air fuel cell and battery,” *Journal of Power Sources*, vol. 271, pp. 65–75, 2014.

[5] D. Desai, X. Wei, D. A. Steingart, and S. Banerjee, “Electrodeposition of preferentially oriented zinc for flow-assisted alkaline batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 256, pp. 145–152, 2014.

[6] J. Liu and Y. Wang, “Preliminary study of high energy density Zn/Ni flow batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 294, pp. 574–579, 2015.

[7] S. S. Zhang, “Liquid electrolyte lithium/sulfur battery: Fundamental chemistry, problems, and solutions,” *Journal Power Sources*, vol. 231, pp. 153–162, 2013.

[8] M. Q. Zhao, X. F. Liu, Q. Zhang, G. L. Tian, J. Q. Huang, W. C. Zhu, and F. Wei, “Graphene/single-walled carbon nanotube hybrids: one-step catalytic growth and applications for high-rate Li-S batteries,” *ACS Nano*, vol. 6, no. 12, pp. 10759–10769, 2012.

[9] T. Zhao, E. Shangguan, Y. Li, J. Li, Z. Chang, Q. Li, X.-Z. Yuan, and H. Wang, “Facile synthesis of high tap density ZnO microspheres as advanced anode material for alkaline nickel-zinc rechargeable batteries,” *Electrochimica Acta*, vol. 182, pp. 173–182, 2015.

[10] X. Xie, Z. Yang, Z. Feng, Z. Zhang, and J. Huang,

"Electrochemical properties of ZnO added with Zn-Al-hydrotalcites as anode materials for Zinc/Nickel alkaline secondary batteries," *Electrochimica Acta*, vol. 154, pp. 308–314, 2015.

[11] L.-J. Liu, Y. Chen, Z.-F. Zhang, X.-L. You, M. D. Walle, Y.-J. Li, and Y.-N. Liu, "Electrochemical reaction of sulfur cathodes with Ni foam current collector in Li-S batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 325, pp. 301–305, 2016.