# การศึกษาทางไฟฟ้าเคมีของสังกะสีแอโนดที่มีจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

# Electrochemical Studies of Zinc Anode with Geopolymer Binder

วิมลวรรณ พลรักษา ชัยภัทร เครือหงส์ วิรัตน์ เจริญบุญ แก้วตา เจตศรีสุภาพ
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในขั้วสังกะสีแอโนด โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์ และมีโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ผลการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีของตัวอย่างขั้วสังกะสีแอโนดโดยเทคนิค cyclic voltammetry 90 รอบในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ พบว่าขั้วสังกะสีแอโนดที่มีความหนา 4 มิลลิเมตรและมีสัดส่วนจีโอโพลิเมอร์ต่อสังกะสีเท่ากับ 32.5 : 6, 32.5 : 9 และ 32.5 : 12 แทบจะไม่แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มสัดส่วนของสังกะสีต่อวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้มากขึ้น หลังจากการใช้งานขั้วสังกะสีแอโนดพบว่าลักษณะรูปร่างอสัณฐานที่ได้จากการวิเคราะห์ผล SEM ของขั้วสังกะสีแอโนดที่มีสัดส่วนจีโอโพลิเมอร์ต่อสังกะสีเท่ากับ 32.5 : 12 เกิดเปลี่ยนแปลง และการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนระหว่างสังกะสีต่อจีโอโพลีเมอร์อาจส่งผลต่อการเกิดเดรนไดร์ตที่มากขึ้น

**คำสำคัญ** :สังกะสีแอโนด, จีโอโพลีเมอร์, วัสดุเชื่อมประสาน, เถ้าลอย

**Abstract**

The electrochemical properties of zinc anode with geopolymer binder have been investigated in this study. The geopolymer binder is composed of fly ash as substrate and sodium silicate ($Na_2SiO_3$) together with sodium hydroxide (NaOH) as activator materials. Cyclic voltammetry experiments of the anodes with different geopolymer to zinc ratios (geopolymer : zinc ratios = 32.5 : 6, 32.5 : 9 and 32.5 : 12) were carried out in 4 M NaOH. In the presence of geopolymer binder, the zinc anode did not show any electrochemical characteristics. SEM analysis was carried out to investigate the physical properties of the electrodes. The surface morphology of the anode with the geopolymer to zinc ratio of 32.5 : 12 showed a potential formation of zinc dendrite after 90 cycles.

**Keywords** : Zinc anode, Geopolymer, Binder, Fly ash

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงาน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น [1] กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจก [2] ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มาทดแทนปูนซีเมนต์ในปัจจุบัน ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งเป็นโพลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ได้จากซิลิกา อะลูมินาและวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้น เช่น ดินเหนียว เถ้าหนัก เถ้าแกลบ เถ้าลอย [3]

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตไฟฟ้าในการเผาไหม้ถ่านหิน ในปัจจุบันมีการใช้ถ่านหินแพร่หลายทั่วโลกประมาณ 600 ล้านตันต่อปี ซึ่งเป็นผลทำให้มีเถ้าลอยที่เป็นของเสียประมาณ 500 ล้านตันต่อปี เถ้าลอยในประเทศไทยนั้นได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีปริมาณของเถ้าลอยที่ได้ 3 ล้านตัน [4] เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งวัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานได้เพราะมีคุณสมบัติปอซโซลาน คือสามารถใช้ทดแทนซีเมนต์ได้เพราะมีอลูมินา ($Al_2O_3$) และซิลิกา ($SiO_2$) ปริมาณมาก

ในกระบวนการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จะใช้อัลคาไลน์เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดเป็นอะลูมิโนซิลิเกต ($Al_2SiO_5$) เจลซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ภายในรูพรุนของจีโอโพลิเมอร์จะมีโมเลกุลของน้ำและไฮดรอกไซด์บรรจุอยู่เรียกว่า pore solution ที่เป็นเบสมี pH ประมาณ 12.4-13.5 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า [5] และนำไอออนได้ คุณสมบัติที่มีในจีโอโพลิเมอร์นี้เหมาะสมจะนำมาใช้ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี [6]

จากการศึกษาของ Meng และคณะ ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่ได้นำซีเมนต์มาเป็นส่วนประกอบของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ดีกระบวนการผลิตซีเมนต์นั้นทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้โดยการนำจีโอโพลิเมอร์มาทดแทนการใช้ซีเมนต์เพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสานในขั้วสังกะสีแอโนดสำหรับสังกะสีอากาศแบตเตอรี่ เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าและนำไอออนได้ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของขั้วสังกะสีแอโนด

## 2. วัสดุและวิธีทำ

**การเตรียมวัสดุจีโอโพลีเมอร์ในขั้วซิงค์แอโนด**

เตรียมขั้วแอโนดซึ่งมีสัดส่วนจีโอโพลีเมอร์ที่ทำมาจากเถ้าลอยประเภท C (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง) โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์โดยบริษัท ACI Labscan Limited (Bangkok, T.H.) และโซเดียมซิลิเกตจากบริษัท Wee-rin Chemical Limited Partnership (Bangkok, T.H.) ต่อสังกะสีจากบริษัท Ajax Finechem (Auckland, N.Z.) เท่ากับ 36.5 : 6, 32.5 : 9 และ 32.5 : 12 จากนั้นนำสารละลายเปียกที่ได้เทลงบนแบบขึ้นรูปขนาด 1 x 2 x 0.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามด้วยจุ่มนิกเกิลโฟมขนาด 0.6 x 1.5 ตารางเซนติเมตร ลงไปบนขั้วห่อด้วยพลาสติกและนำเข้าเตาอบอุณหภูมิ 60 $^{O}$C เวลา 24 ชั่วโมง

**เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ขั้วสังกะสีแอโนด**

การทดสอบทางไฟฟ้าเคมีโดยการใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) ศึกษาเทคนิค cyclic voltammetry นี้เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมการชาร์จและการจ่ายประจุของแบตเตอรี่การทดสอบไฟฟ้าเคมีแบบใช้เซลล์ไฟฟ้า 3 ขั้ว ประกอบด้วย ขั้วทำงาน (working electrode) คือ สังกะสีที่มีเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) คือ แผ่นเงิน Ag/AgCl สังเคราะห์ และขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) คือ กราไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขั้วสังกะสีที่ทำการศึกษามีความหนา 4 มิลลิเมตร และการซึมผ่านของละลายอิเล็กโทรไลต์ในจีโอโพลิเมอร์เป็นไปได้ยากจึงได้ใช้วิธีการแช่ขั้วเป็นเวลา 4 ชั่วโมงก่อนการทดลอง cyclic voltammetry เพื่อให้อิเล็กโทรไลต์ซึมผ่านเข้าไปในขั้วและโลหะสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ทดสอบระหว่าง -1.41 ถึง 0.6 V ที่อัตราสแกน 10 mV/s

XRD โดยใช้รังสีCu-kα เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางเคมีของสังกะสีและสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในขั้วสังกะสีแอโนด

SEM รุ่น S-3000N บริษัท ฮิตาชิ ประเทศญี่ปุ่น ใช้ในการศึกษาลักษณะ รายละเอียด โครงสร้างพื้นผิวของขั้วสังกะสี

## 3. วิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีโดยการใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) วัดแบบ cyclic voltammetry เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของขั้วสังกะสีแอโนด พบว่าระหว่างแช่ขั้วเกิดก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากตลอดเวลาที่แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์อิเล็กโทรไลต์ สันนิษฐานว่าสังกะสีในขั้วแอโนดทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นสังกะสีบางส่วนน่าจะสูญเสียไปตั้งแต่แช่สารละลายอิเล็กโทรไลต์และอาจทำให้สังกะสีที่เหลืออยู่มีปริมาณลดลง หลังจากการแช่จึงนำขั้วสังกะสีแอโนดที่มีวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีที่ 1-90 รอบ จากรูปที่ 1a และ 1b พบว่าการทดสอบรอบที่ 1 มีพีคเกิดขึ้นต่างจากรอบที่ 10 และรอบที่ 90 เนื่องจากที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดเกิดก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นจำนวนมาก โดยพีค C2 บ่งชี้การเกิดก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen evolution) จากการวิเคราะห์รอบที่ 10 หลังจากขั้วสังกะสีแอโนดทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เกิดพีคแอโนดิค 3 พีค โดยไม่ปรากฏพีคของปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของสังกะสี พีคที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นพีคของสารประกอบอื่น ๆ ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นต้นว่าสารประกอบของเหล็ก ซึ่งแสดงที่ศักย์ไฟฟ้าที่ -0.2 V และ -0.5 V เมื่อเทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl [7] และยังมีคาโทดิคพีคที่ประมาณ 0.3 V ชี้ให้เห็นว่าเป็นพีคของเงิน การปรากฏว่ามีพีคนี้ขึ้นเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ใช้ Ag/AgCl ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นขั้วอ้างอิง ในขณะทดลองเมื่อเพิ่มรอบในการทำงานของขั้วแอโนดมากขึ้น ขั้วอ้างอิงจะเริ่มเสื่อมสภาพโดยมีผิวของ Ag/AgCl ที่เป็นขั้วอ้างอิงสังเคราะห์หลุดออกมาเป็นแผ่นสีดำลอยอยู่บนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของขั้วอ้างอิง Ag/AgCl สังเคราะห์ ทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์เกิดเป็นโลหะเงิน น้ำ โซเดียมคลอไลด์และออกซิเจนเกิดขึ้นในระบบ ดังสมการที่ 1

$$AgCl_{(s)} + NaOH_{(aq)} \longrightarrow Ag + H_2O + NaCl + O_2 \quad (1)$$

นอกจากนี้การที่ไม่ปรากฏพีคของสังกะสีเกิดขึ้นทั้งในปฏิกิริยาออกซิเดชั่นและรีดักชั่น อาจเกิดได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. การเตรียมขั้วซึ่งต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อละลายเถ้าลอยเพื่อให้เกิดกระบวนการ geopolymerization 2. หลังจากขึ้นรูปแล้วจีโอโพลิเมอร์มีสารละลายในรูพรุน (pore solution) ที่มีความเป็นเบส pH 12-14 [5] ทำให้อนุภาคสังกะสีที่อยู่รอบ ๆ สารละลายในรูพรุนในเนื้อจีโอโพลิเมอร์และที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกออกซิไดซ์ไปแล้วด้วย 3. เกิดจากวิธีการเตรียมการทดลอง cyclic voltammetry จากการที่สังกะสีสัมผัสกับสารละลายเบสในกระบวนการการทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างผิวขั้วจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน hydrogen evolution reaction (HER) [8] เกิดขึ้นบนพื้นผิวของขั้วสังกะสีแอโนดดังสมการที่ 2

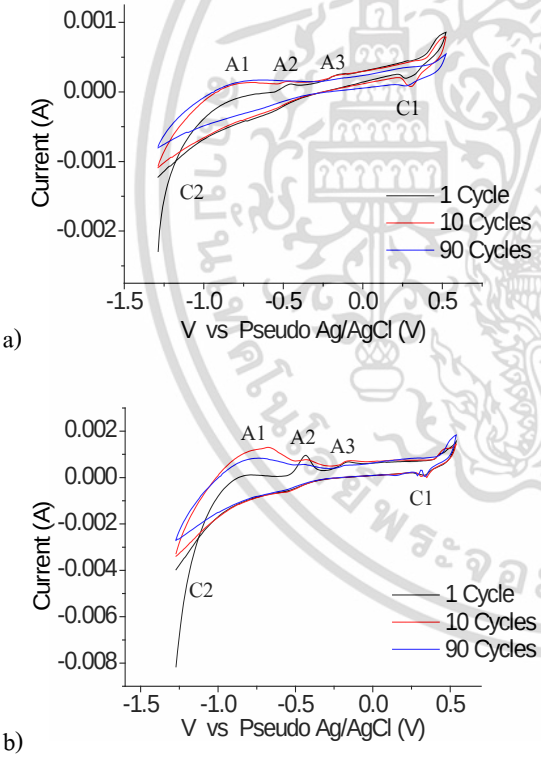
$$Zn + 2H_2O \longrightarrow Zn(OH)_2 + H_2 \quad (2)$$

จากปฏิกิริยานี้ทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวของสังกะสีที่สามารถใช้ในปฏิกิริยาได้มีลดน้อยลงอย่างมีนัยยะและไม่แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี นอกจากนี้ มีการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยา และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

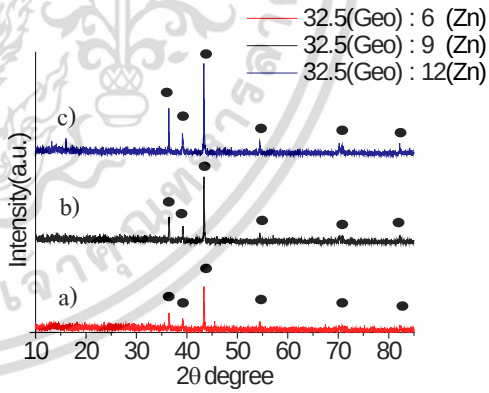
สังเกตได้จากพีค C2 มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นทุกสัดส่วนของสังกะสีที่เติมเข้าไป

การใช้แผ่นเงินเป็นขั้วอ้างอิงทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีควรจะเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นขั้วประเภทอื่นที่ทนต่อสารสารละลายเบส เช่น mercury-mercury oxide (Hg/HgO), calomel ($Hg/Hg_2Cl_2$), mercury-mercurous sulfate ($Hg/Hg_2SO_4$), silver-silver sulfate ($Ag/Ag_2SO_4$), copper-copper sulfate ($Cu/CuSO_4$) เป็นต้น หรืออาจจะใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl มาตรฐานโดยใช้สะพานเกลือหรือสะพานไอออนในการทำการทดลองเพื่อไม่ให้ขั้ว Ag/AgCl สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยตรง




**รูปที่ 1** cyclic voltammogram ของขั้วแอโนดหลังจากการทดสอบทางไฟฟ้าเคมี 90 รอบ ที่มีสัดส่วนจีโอโพลิเมอร์ : สังกะสีที่แตกต่างกัน a) 32.5 : 9 b) 32.5 : 12 โดยมวลเปียก ใช้ Ag/AgCl สังเคราะห์เป็นขั้วอ้างอิง

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของขั้วสังกะสีเพื่อหาองค์ประกอบของขั้วสังกะสีแอโนดก่อนและหลังการทดสอบทางไฟฟ้าเคมี 90 รอบจะแสดงถึงปริมาณสังกะสีและสารประกอบต่างๆที่มีอยู่ในขั้ว ในรูปที่ 2 ขั้วสังกะสีแอโนดที่มีปริมาณสังกะสีที่แตกต่างกันนั้น ปรากฏพีค XRD ที่ 36.4, 39.1, 43.2, 45.5, 54.5, 70 และ 82.1 องศา ซึ่งเป็นพีคของสังกะสี บ่งชี้ว่าการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ในระหว่างกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นพบว่ายังมีปริมาณสังกะสีเหลืออยู่และสามารถทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ได้ แต่ผลจาก cyclic voltammogram ของขั้วที่มีปริมาณสังกะสีในสัดส่วนมากขึ้นที่ 32.5 : 9 และ 32.5 : 12 โดยมวลเปียก กลับไม่ปรากฏการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นเของสังกะสี ซึ่งโดยปกติการเกิดซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาออกซิเดชั่นบนพื้นผิวสังกะสีสามารถเกิดขึ้นได้เพียงแค่สังกะสีสัมผัสอากาศ [9] สาเหตุที่ไม่ปรากฏซิงค์ออกไซด์จากการวิเคราะห์ XRD อาจเป็นเพราะปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่ขณะนั้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของสังกะสีบริสุทธิ์ประกอบกับเถ้าลอยมีลักษณะเป็นอสัณฐาน [4], [6] การแสดงผล intensity ของพีคซิงค์ออกไซด์ที่มีจึงไม่โดดเด่น

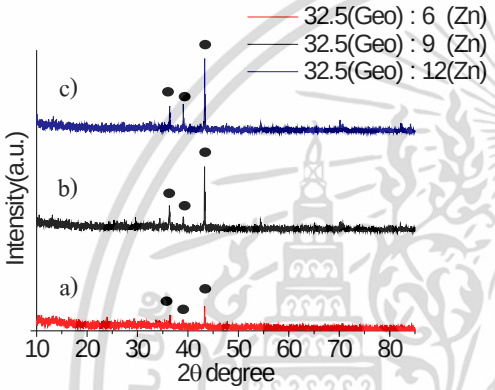



**รูปที่ 2** การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกก่อนการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีที่มีสัดส่วนมวลเปียกของจีโอโพลิเมอร์ : สังกะสีที่แตกต่างกัน a) 32.5 : 6 b) 32.5 : 9 c) 32.5 : 12

จากรูปที่ 3 เมื่อนำขั้วสังกะสีแอโนดที่มีวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานไปทดสอบ cyclic voltammetry 90 รอบมาวิเคราะห์ทางโครงสร้างผลึกพบว่าขั้วสังกะสีแอโนดทั้งสามตัวอย่างแสดงพีคที่ 36.4, 39.1 และ 43.2 องศา ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

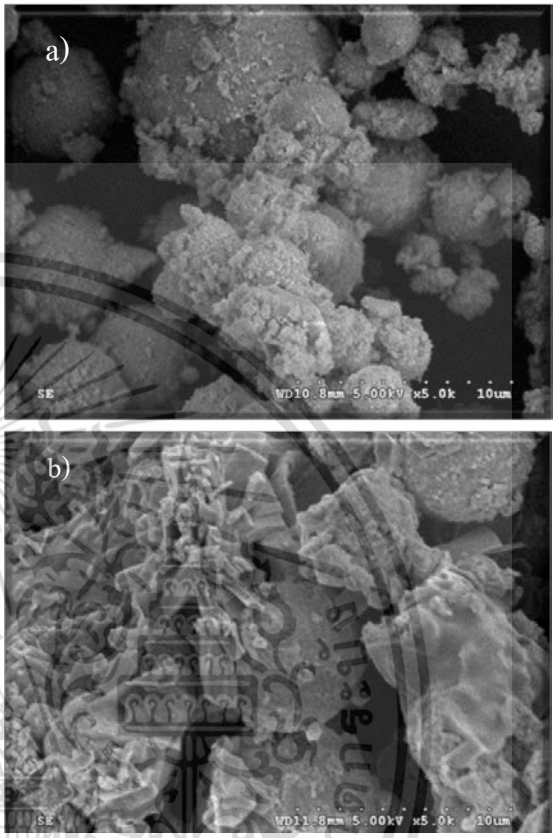
อ้างอิง [10] บ่งชี้ว่าเป็นพีคของสังกะสี อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วเดียวกันก่อนทำการทดสอบ cyclic voltammetry (รูปที่ 2) พบว่า intensity ของพีคที่พบนั้นลดลง แสดงว่าสังกะสีที่มีอยู่ในขั้วมีปริมาณน้อยลง ถึงแม้ว่าจะมีสังกะสีอยู่ในขั้ว ผลที่ได้กลับไม่สอดคล้องกับ cyclic voltammogram เนื่องจากไม่ปรากฏพีคที่บ่งชี้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของสังกะสี ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่าสังกะสีที่อยู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์แพร่เข้าสู่ขั้วได้ยาก เนื่องจากขั้วแอโนดมีลักษณะทึบหนาและไม่มีโครงสร้างตาข่ายเชื่อมต่อกันภายในขั้ว




**รูปที่ 3** การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีที่มีสัดส่วนที่แตกต่างกันโดยมวลเปียกของจีโอโพลิเมอร์ : สังกะสี a) 32.5 : 6 b) 32.5 : 9 c) 32.5 : 12

ศึกษาลักษณะของพื้นผิวขั้วแอโนดโดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของขั้วทำให้ได้ภาพ 3 มิติโดยใช้ขั้วแอโนดก่อนทำ cyclic voltammetry และหลังทำ cyclic voltammetry ที่ 90 รอบ เพื่อดูลักษณะที่แตกต่างและวิเคราะห์องค์ประกอบที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 4a แสดงผลรูปร่างของขั้วสังกะสีแอโนดก่อนทดสอบไฟฟ้าเคมีมีลักษณะคล้ายมอสปกคลุมทั่วไปบนลูกทรงกลมที่น่าจะเป็นเถ้าลอยที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Geopolymerisation) เมื่อขั้วสังกะสีแอโนดผ่านการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีแล้ว (รูปที่ 4b) แสดงผลที่มีรูปร่างลักษณะที่เปลี่ยนไปจากรูป 4a โดยมีผลึกวางซ้อนกันเกิดบนเถ้าลอย จากการศึกษาของ Mainar และคณะ [11] ได้แสดงถึงลักษณะการเกิดเดรนไดต์ในขั้วแบตเตอรี่ที่มีรูปร่างคล้ายแผ่นหินซ้อนทับกัน (Boulder) คล้ายรูปที่ 4b โดยเดรนไดต์นี้เมื่อเกิดการสะสมบนขั้วมากขึ้นส่งผลให้สูญเสียพื้นผิวในการทำปฏิกิริยาจึงให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพลดลงและสามารถทำให้แบตเตอรี่เกิดการลัดลงจร




**รูปที่ 4** ขั้วแอโนดที่มีสัดส่วนจีโอโพลิเมอร์ต่อสังกะสี 32.5 : 12 โดยมวลขณะเปียก a) ก่อนนำไปทดสอบทางไฟฟ้าเคมี (cyclic voltammetry) b) หลังนำไปทดสอบไฟฟ้าเคมี (cyclic voltammetry) ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ อัตราการสแกน 10 mV/s ที่ 90 รอบ

## 4. สรุป

แม้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค XRD พบว่าก่อนและหลังการทดสอบ cyclic voltammetry 90 รอบ ขั้วสังกะสีแอโนดที่มีวัสดุจีโอโพลิเมอร์เชื่อมประสานนั้นมีองค์ประกอบของธาตุสังกะสีอยู่ด้วย ผลการทดสอบไฟฟ้าเคมีโดยเทคนิค cyclic voltammetry กลับไม่พบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของสังกะสี ซึ่งอาจเกิดจากการที่สังกะสีที่อยู่บริเวณผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปจนหมดตั้งแต่กระบวนการแช่ขั้ว (Pre-treatment) สังกะสีในที่ปรากฏในการทดสอบ XRD น่าจะเป็นสังกะสีที่อยู่แก่นกลางภายในขั้ว เนื่องจากขั้วสังกะสีแอโนดหนา ทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์แพร่เข้าสู่ภายในขั้วได้ยาก ดังนั้นสังกะสีที่อยู่แก่นกลางของขั้วจึงไม่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ไม่แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี อีกทั้งสัดส่วนของจีโอโพลีเมอร์ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมีมากทำให้ขั้วมีความต้านทานสูง

## 5. ข้อเสนอแนะ

วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะทึบหนาและมีความต้านทานสูงทำให้การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นได้น้อย ดังนั้นเพื่อลดความต้านทานภายในขั้ว จึงควรหาสัดส่วนระหว่างสังกะสีและวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม การลดสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานโดยการเพิ่มปริมาณของสังกะสีจะช่วยลดความต้านทานและเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ดีการเพิ่มสัดส่วนของสังกะสีอาจส่งผลต่อความแข็งแรงของขั้ว

นอกจากนี้การพัฒนาขั้วให้บางลงจะช่วยลดความต้านทาน และทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถแพร่เข้าไปในขั้วแอโนดได้ง่าย

การเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะและการนำไฟฟ้านั้นยังอาจทำได้โดยการเพิ่มสัดส่วนของโพลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้มาร่วมเป็นวัสดุเชื่อมประสาน อาทิเช่น โพลีอะนีลีนซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้และความมีความหยุ่นเป็นต้น

การเพิ่มวัสดุคาร์บอน (Carbon additive) ที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า เช่น คาร์บอนแบล็ก (Carbon black) กราไฟต์ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ในขั้วก็อาจส่งผลให้ขั้วสังกะสีแอโนดมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วิทยา อมรกิจบำรุง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศาสตราจารย์ปริญญา จินดาประเสริฐคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นสำหรับคำแนะนำและเป็นที่ปรึกษางานวิจัย รวมทั้งทุนอุดหนุนและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่นสำหรับนางสาววิมลวรรณ พลรักษา

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Ahmaruzzaman, “A review on the utilization of fly ash,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol.36, No.3, pp.327–363, June, 2010.

[2] J. Davidovits, “Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries,” World Resource Review United State, Vol.6, No.2, pp. 263-278, June, 1994.

[3] A. F. Abdalqader, F. Jin, and A. Al-Tabbaa, “Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures,” Journal of Cleaner Production, Vol.113, pp.66–75, Feb., 2016.

[4] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, “Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer,” Cement and Concrete Composites, Vol.29, No.3, pp.224–229, March, 2007.

[5] K. Andersson, B. Allard, M. Bengtsson, and B. Magnusson, “Chemical composition of cement pore solutions,” Cement and Concrete Research, Vol. 19, No.3, pp.327–332, May, 1989.

[6] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, and P. Chindaprasirt, “Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste,” Cement and Concrete Composites, Vol.45, pp.9–14, Jan., 2014.

[7] C. Sumathi, P. Muthukumaran, S. Radhakrishnan, G. Ravi, and J. Wilson, “Riboflavin detection by α-Fe2O3/MWCNT/AuNPs-based composite and a study of the interaction of riboflavin with DNA,”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Royal society of chemistry Advances, Vol.5, pp.17888–17896, Jan., 2015.

[8] Y. Li and H. Dai, "Recent advances in zinc–air batteries," Chemical Society Reviews, Vol.43, pp.5257–5275, June, 2014.

[9] M. Cai and S.-M. Park, "Spectroelectrochemical Studies on Dissolution and Passivation of Zinc Electrodes in Alkaline Solutions," Journal of The Electrochemical Society, Vol.143, No.7, pp.2125–2131, Feb., 1996.

[10] M. N. Masri and A. A. Mohamad, "Effect of Adding Carbon Black to a Porous Zinc Anode in a Zinc-Air Battery," Journal of The Electrochemical Society, Vol.160, No.4, pp.A715–A721, Feb., 2013.

[11] A. R. Mainar et al., "Alkaline aqueous electrolytes for secondary zinc–air batteries: an overview," International Journal of Energy Research, Vol.40, No.8, pp.1032–1049, Feb., 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้