



ชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่ายที่ทำจากเจลอิเล็กโทรไลต์



สุจิตตรา เจนงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

ชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่ายที่ทำจากเจลอิเล็กโทรไลต์



สุจิตตรา เจนงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

A Simple Electrochemical Experiment Kit Made from Electrolyte Gels



SUCHITTRA CHANNGAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE
IN CHEMICAL EDUCATION
FACULTY OF SCIENCE
BURAPHA UNIVERSITY

2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ สุจิตตรา เจนงาน ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)

(รองศาสตราจารย์ ดร.พัชรี ร่มพยอม วิชัยดิษฐ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.การะเกด เทศศรี)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ต้นติวรานุรักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเอียด)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

62920413: สาขาวิชา: เคมีศึกษา; วท.ม. (เคมีศึกษา)

คำสำคัญ: ไฟฟ้าเคมี, เซลล์กัลวานิก, อิเล็กโทรไลต์เจล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์และความคงทนของ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกที่เตรียมจากเจลอิเล็กโทรไลต์ ในการประยุกต์สร้างแบตเตอรี่อย่าง ง่าย และนำไปศึกษาประสิทธิภาพของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการทำโลหะให้บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับ ถ่านไฟฉาย ผลการวิจัยพบว่า 1) ความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกที่เตรียมจาก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 เข้มข้น 1.00 M ผสมกับคาร์ราจีแนน คาร์ราจีแนน และเจลาติน มีศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 1.076 V, 1.093 V, และ 1.095 V ตามลำดับ หลัง 6 ชั่วโมง ศักย์ไฟฟาลดลงเหลือ 0.974 V, 0.989 V และ 0.954 V ตามลำดับ 2) การสร้างต้นแบบแบตเตอรี่เจล 6 เซลล์ที่ทำจาก CuSO_4 และ ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.10 M ผสมกับคาร์ราจีแนน ต่อดวงจรรูกรม ของเซลล์กัลวานิกแต่ละเซลล์ด้วยขั้วโลหะสังกะสีและทองแดงที่เย็บติดกันด้วยคีมย้ำโลหะ มีค่า ศักย์ไฟฟ้า เริ่มต้น 6.433 V หลัง 6 ชั่วโมงศักย์ไฟฟาลดลงเหลือ 5.173 V 3) การชุบตะปูเหล็กด้วย สังกะสีที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์ 6 เซลล์ มีผลได้ร้อยละที่คำนวณจากกฎของฟาราเดย์ เท่ากับ 93.5965 มีประสิทธิภาพการชุบที่สูงกว่าการใช้ถ่านไฟฉาย 6 V ที่มีผลได้ร้อยละ 8.2044 4) การแยกสังกะสีออกจากโลหะเมทัลซีท (AZ70 อลูมิเนียม 0.23 มม.) โดยใช้แบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทร ไลต์ 6 เซลล์ มีผลได้ร้อยละเท่ากับ 90.5335 มีประสิทธิภาพการแยกสังกะสีบริสุทธิ์สูงกว่าการใช้ ถ่านไฟฉาย 6 V ที่มีผลได้ร้อยละ 15.4530 สรุปได้ว่าแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ 6 เซลล์ที่สร้างขึ้นมี ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน มีความคงทนยาวนานกว่า 6 ชั่วโมงสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงาน ทดแทนถ่านไฟฉายในห้องปฏิบัติการได้

62920413: MAJOR: CHEMICAL EDUCATION; M.Sc. (CHEMICAL EDUCATION)

KEYWORDS: Electrochemistry, Electrolyte gels, Galvanic cell

SUCHITTRA CHANNGAN : A SIMPLE ELECTROCHEMICAL EXPERIMENT KIT
MADE FROM ELECTROLYTE GELS. ADVISORY COMMITTEE: AKAPONG SUWATTANAMALA,
Ph.D. 2024.

This research focused on the properties and stability of gel electrolytes in galvanic cells for simple battery construction and compared their efficiency in electroplating and metal purification to conventional dry cells. The findings were 1) Galvanic cells with 1.0 M CuSO_4 and ZnSO_4 electrolytes mixed with agar-carrageenan, carrageenan, and gelatin had initial voltages of 1.076 V, 1.093 V, and 1.095 V, respectively. After 6 hours, the voltages decreased to 0.974 V, 0.989 V, and 0.954 V, respectively. 2) A prototype gel battery made of six cells using 0.10 M CuSO_4 and ZnSO_4 mixed with carrageenan had an initial voltage of 6.433 V, which dropped to 5.173 V after 6 hours. 3) Zinc electroplating of iron nails using a 6-cell gel battery achieved an efficiency of 93.5965%, higher than the 8.2044% efficiency obtained with a 6 V dry cell. 4) Purifying zinc from AZ70 aluminum-zinc alloy sheets (0.23 mm) with the 6-cell gel battery had a yield of 90.53%, better than the 15.45% yield using a 6 V dry cell. In conclusion, the 6-cell gel battery showed stable electric potential for over 6 hours and performed well in electroplating and metal purification. This suggests that the gel electrolyte battery could be a good alternative to dry cells for laboratory use.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการแนะนำ ช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พัชรี ร่มพยอม วิชัยดิษฐ ประธานสอบวิทยานิพนธ์และ รศ.ดร.การะเกด เทศศรี และผศ.ดร.ธีรนนท์ ศิริदानนท์ กรรมการสอบที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางที่ถูกที่ควร ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจให้เกิดการเรียนรู้อย่างไม่รู้จบสิ้น เป็นความเมตตากรุณาที่ยิ่งใหญ่จากอาจารย์ที่มีต่อลูกศิษย์ ขอขอบพระคุณผู้บริหารสถานศึกษาและคณะครูผู้ร่วมงานโรงเรียนปากช่อง ที่ต้องปฏิบัติหน้าที่และรับผิดชอบงานแทนผู้วิจัยในขณะลาศึกษาต่อ เหนือสิ่งอื่นใดขอขอบพระคุณครอบครัว นายธนภัทร หนูมาน้อย ที่ปรึกษา ด้านการใช้เครื่องมือช่างและวงจรไฟฟ้า เพื่อนๆ เคมีศึกษาที่ให้ทั้งกำลังใจและตลอดจนการสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่พระคุณของบุพการี บิดา มารดาบูรพาจารย์และผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

สุจิตตรา เจนงาน

สารบัญ

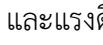
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
สมมติฐานของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
ขอบเขตการวิจัย.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
บทที่ 2.....	6
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
1. เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry).....	6
2. การศึกษาเกี่ยวกับชุดการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	9
3. ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids).....	16
4. การศึกษาเกี่ยวกับเจลลี่เล็กโพลีไธด์.....	23
5. การศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบตเตอรี่อย่างง่าย.....	26

6. การศึกษาเกี่ยวกับการชุบด้วยไฟฟ้าและการทำโลหะให้บริสุทธิ์	28
บทที่ 3.....	31
วิธีดำเนินการวิจัย	31
บทที่ 4.....	39
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	39
ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติเจลลี่เล็กโพลีโพลี.....	39
ตอนที่ 2 การศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกประเภทเจลลี่เล็กโพลีโพลี.....	43
ตอนที่ 3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่ใช้เตรียมเซลล์กัลวานิกประเภทเจลลี่เล็กโพลีโพลีที่มีผลต่อความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้า.....	48
ตอนที่ 4 การสร้างแบตเตอรี่จากเจลลี่เล็กโพลีโพลีและทดสอบสมบัติความคงทนต่อค่าศักย์ไฟฟ้า	51
ตอนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพการชุบโลหะโดยใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่เล็กโพลีโพลีเทียบกับแบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย.....	54
ตอนที่ 6 การศึกษาประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่เล็กโพลีโพลีเทียบกับแบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย.....	59
บทที่ 5.....	63
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	63
สรุปผลการวิจัย	63
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้	65
ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป.....	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	72
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	81

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิด.....	39
ตารางที่ 2 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ ที่ 25 °C.....	42
ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิด	44
ตารางที่ 4 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิดที่ 25 °C .	45
ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพเจลอิเล็กโทรไลต์เซลล์กัลวานิกที่ความเข้มข้นต่างๆ หลัง 6 ชั่วโมง.	48
ตารางที่ 6 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของเจลอิเล็กโทรไลต์เซลล์กัลวานิกที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ 25 °C	49
ตารางที่ 7 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ 25 °C.....	53
ตารางที่ 8 การชุบตะปูดัวยไฟฟ้าโดยใช้แหล่งจ่ายไฟจากถ่านไฟฉายและแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์	55
ตารางที่ 9 น้ำหนักของตะปูและสังกะสีก่อนและหลังชุบด้วยไฟฟ้า.....	56
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลได้ร้อยละของสังกะสีที่ผิวตะปูจากการชุบด้วยไฟฟ้า.....	57
ตารางที่ 11 การทดลองการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าโดยใช้แหล่งจ่ายไฟจากถ่านไฟฉายและ แบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์	59
ตารางที่ 12 น้ำหนักของโลหะสังกะสีและแผ่นเมทัลชีทก่อนและหลังทำให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า	60
ตารางที่ 13 เปรียบเทียบผลได้ร้อยละของน้ำหนักสังกะสีที่ได้จากการทำให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า	61

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ประเภทเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	7
ภาพที่ 2 เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน.....	9
ภาพที่ 3 ชุดทดลองเซลล์กัลวานิกจากโพมดอกไม้.....	10
ภาพที่ 4 การสร้างเซลล์กัลวานิกขนาดเล็ก.....	11
ภาพที่ 5 เซลล์กัลวานิกอย่างง่าย 3 ส่วน.....	12
ภาพที่ 6 โมดูลครึ่งเซลล์อิเล็กโทรนิคส์.....	12
ภาพที่ 7 การออกแบบชุดการทดลองเคมีไฟฟ้าย่อส่วน.....	13
ภาพที่ 8 เซลล์กัลวานิกโดยใช้กระดาษ.....	14
ภาพที่ 9 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ประเภท.....	18
ภาพที่ 10 โครงสร้างของอากาโรส (Agarose) และอากาโรแพคติน (Agaropectin).....	19
ภาพที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของอากาโรไบโอส (Agarobiose).....	19
ภาพที่ 12 การเกิดเจลของวุ้น.....	20
ภาพที่ 13 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน.....	22
ภาพที่ 14 การเปลี่ยนสภาพของเจลาติน.....	23
ภาพที่ 15 การทดลองอิเล็กโทรไลซิสของน้ำโดยใช้ไฮโดรเจล.....	24
ภาพที่ 16 การใช้เจล ZnSO ₄ ในการทดลองเคมีไฟฟ้า.....	25
ภาพที่ 17 แบตเตอรี่จากการต่อวงจรอนุกรมของเซลล์กัลวานิก.....	26
ภาพที่ 18 ตัวอย่างรูปแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำให้หลอดไฟ LED ติด.....	27
ภาพที่ 19 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส (Agar) และการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ.....	40
ภาพที่ 20 (ก) พันธะไอออนิก () และแรงดึงดูดทางไฟฟ้า () ของแคตไอออนภายใน โมเลกุล K-คาร์ราจีแนน ในสารละลายที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิต่ำ (ข) กลไกการเกิดเจลของ K-คาร์ราจีแนน กับโพแทสเซียมไอออน (K ⁺).....	41

ภาพที่ 21 (ก) ปฏิกิริยาระหว่างไอออนและโมเลกุลเจลาตินที่มีไอออน +2 และ (ข) ไอออน +1 41

ภาพที่ 22 เปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียน้ำเฉลี่ย (%water loss) ของเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิด
เข้มข้น 1.00 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง..... 42

ภาพที่ 23 การจับคู่ประจุประจุไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกของเจลอิเล็กโทรไลต์ Cu^{2+} และ Zn^{2+}
โดยการวางเจลติดกันและไม่ต้องใช้สะพานเกลือ 43

ภาพที่ 24 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนในเซลล์กัลวานิกแบบเจลอิเล็กโทรไลต์..... 45

ภาพที่ 25 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด 46

ภาพที่ 26 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด 47

ภาพที่ 27 แสดงกระบวนการสร้างไฮโดรเจลและคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำเพื่อเป็นช่องทางการ
เคลื่อนที่ของไอออน..... 48

ภาพที่ 28 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 4 ความเข้มข้น 50

ภาพที่ 29 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 4 ความเข้มข้น 51

ภาพที่ 30 ต้นแบบของแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ (ก) วงจรอนุกรมของแบตเตอรี่เจล 6 เซลล์ 52

ภาพที่ 31 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวงจรแบบอนุกรมของแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์
จำนวน 6 เซลล์..... 52

ภาพที่ 32 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ 25 °C..... 53

ภาพที่ 33 การจับคู่ประจุในการทดลองชุบตะปูด้วยสังกะสี 54

ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบผลได้จริงและผลได้ทางทฤษฎีที่ได้หลังการชุบตะปูเหล็กด้วยไฟฟ้า 58

ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบผลได้จริงและผลได้ทางทฤษฎีที่ได้จากการแยกแอมัลซีด้วยไฟฟ้า 62

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

หัวข้อเคมีไฟฟ้าเป็นเนื้อหาที่สำคัญของการเรียนวิชาเคมีในระดับมัธยมศึกษาและอุดมศึกษา นักเรียนได้ศึกษาหลักการพื้นฐานของเคมีไฟฟ้าในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายและเรียนรู้การประยุกต์ใช้หลักการพื้นฐานสำหรับการศึกษาระดับสูงต่อไปในระดับอุดมศึกษา โดยหลักการพื้นฐานครอบคลุมการเรียนรู้เกี่ยวกับสมบัติของขั้วไฟฟ้า อิเล็กโทรไลต์ การนำไฟฟ้า ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เซลล์กัลวานิก เซลล์อิเล็กโทรไลติก การแยกสารที่หลอมเหลวและสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า การชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า และ การทำให้โลหะบริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า รวมถึงการประยุกต์ใช้หลักการพื้นฐานกับการแก้ปัญหาในโลกแห่งความเป็นจริงและกระบวนการในภาคอุตสาหกรรม โดยทั่วไปการจัดการเรียนรู้ในวิชาเคมีระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายมักเกี่ยวข้องกับการทดลองเพื่อตรวจสอบความเข้าใจในเรื่องต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้สารเคมีในปริมาณมาก และไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้รวมทั้งมีการกำจัดที่ไม่ถูกวิธี ซึ่งถือเป็นของเสียอันตราย ในทางกลับกันหากสามารถลดของเสียจากสารเคมีได้ตั้งแต่ต้นทางเพื่อป้องกันการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งที่ควรทำและควรตระหนักถึง ตัวอย่างเช่น Reduce เป็นการลดขนาดการทดลองอยู่ในระดับเล็ก การสาธิตการทดลองหรือใช้สื่อการสอนเสมือนจริง Reuse เป็นการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ในสภาพเดิม เช่น ตัวละลายนำมาล้างภาชนะ ของแข็งที่รองรับรีเอเจนต์ (Solid supported reagent) และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) นำกลับคืนมาใช้ใหม่ การนำภาชนะบรรจุสารเคมีที่ล้างสะอาดกลับมาใช้ใหม่ และ Recycle เป็นการนำของเสียมาปรับสภาพหรือทำให้บริสุทธิ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ธีรยุทธ วิไลวัลย์ และคณะ.(2560, หน้า 21-22) เมื่อวิเคราะห์ปฏิบัติการเคมีไฟฟ้าระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2563) มักหลีกเลี่ยงการใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงและเป็นอันตราย แต่ยังคงมีการทดลองที่จำเป็นต้องใช้สารละลายความเข้มข้นสูง เช่น การทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (CuSO_4) และซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) เข้มข้น 1.0 M รวมทั้งใช้สารละลายอิมตัวของโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) เป็นสะพานเกลือ เนื่องจากผลการทดลองที่นักเรียนได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน (ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น 1.0 M อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 atm) แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่นักเรียนได้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐานเล็กน้อย เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความบริสุทธิ์ของสารและขั้วโลหะที่ใช้ ความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้ารวมทั้งอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ส่งผลให้

ผู้เรียนเกิดความคลาดเคลื่อนในการเรียนรู้โดยทั่วไปการทดลองพื้นฐานเกี่ยวกับเซลล์กัลวานิกนี้เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างครึ่งเซลล์ หลังจากการทดลองสารละลายไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และต้องเตรียมสารละลายใหม่สำหรับการทดลองกลุ่มอื่น ๆ ทุกครั้ง และมีปัจจัยของอุปกรณ์สายไฟ เครื่องมือวัด เครื่องแก้ว ไม่เพียงพอหากต้องทดลองพร้อมกันหลายห้อง ผู้วิจัยจึงศึกษาการทดลองที่ลดการใช้สารเคมีและอุปกรณ์ของ มาลัย นามวงษ์ (2561) ได้ออกแบบชุดทดลองอย่างง่าย ที่ทำจากเส้นด้ายเพื่อส่งเสริมความเข้าใจของนักเรียนในเรื่องเซลล์กัลวานิกให้ถูกต้อง โดยเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายและราคาถูก ทำได้ง่าย ใช้เวลาและปริมาณสารเคมีในการทดลองน้อย Intaraprasit et al. (2023) ออกแบบการทดลองเคมีไฟฟ้าอย่างง่ายหลายหัวข้อใช้งานหลุมเพาะเชื้อ โดยมีการทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิก การวัดศักย์ไฟฟ้ารีดักชันครึ่งเซลล์มาตรฐานโดยใช้อิเล็กโทรดไฮโดรเจน วงจรอนุกรมของเซลล์เพื่อจ่ายไฟ LED หรือเสียงเบนเซอร์ Chatmontree et al. (2015) ออกแบบเซลล์กัลวานิกโดยใช้กระดาษกรอง ซึ่ผึ้ง ขึ้นโลหะ และสารละลายของไอออนโลหะ เช่น Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} ฯลฯ วัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์หลายๆ คู่ได้ Arnold and Kyasa (2023) ออกแบบโมดูลครึ่งเซลล์อิเล็กโทรนิคส์เพื่อจำลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีจำลอง 14 เซลล์ สามารถทดลองโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายทำให้เหมาะสำหรับการสาธิตระยะไกล สามารถจำลองอุณหภูมิและความเข้มข้นที่แตกต่างกันได้ และได้ผลการทดลองที่ตรงกับค่าทางทฤษฎี เช่นเดียวกับการทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ถ่านไฟฉายทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าลงในเซลล์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น การทดลองชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การทำสารให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า เป็นต้น โดยถ่านไฟฉายเป็นแบตเตอรี่ประเภทเซลล์ปฐมภูมิที่ใช้แล้วไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งของเสียจากการทดลองที่กล่าวมานั้นจัดเป็นของเสียที่มีโลหะหนัก (Heavy metal waste) รวมถึงการปนเปื้อนไอออนของโลหะหนักในสารละลาย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรมีวิธีการกำจัดที่ถูกต้อง ซึ่งส่งผลให้ต้องเพิ่มงบประมาณหรือค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือการบำบัดของเสียตามมา จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องการสร้างสื่อหรือออกแบบวิธีการทดลองเรื่องแบตเตอรี่ของ Karpudewan and Daman Huri (2022) เสนอการใช้แหล่งพลังงานอื่นมาทดแทนในการทดลอง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) มาใช้ในการทดลองเรื่อง การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยหลักความเข้าใจในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด หลังจากผ่านกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ลงไป นักเรียนสามารถออกแบบชุดการทดลองที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้ Tan et al. (2019) ศึกษาการออกแบบแบตเตอรี่โดยใช้หลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โดยใช้ไข่ขาวเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ออกแบบแบตเตอรี่โดยต่อวงจรอนุกรมของเซลล์กัลวานิกเข้าด้วยกัน 6 คู่ เพื่อให้ได้อิโอดเปล่งแสง สามารถทำให้นักเรียนเข้าใจหลักการของแบตเตอรี่ได้ถูกต้องมากขึ้นและนำมาใช้ในห้องเรียนได้จริง

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นผู้วิจัยได้พบว่า การใช้สารละลายในการทดลองมีความยุ่งยากในการจัดอุปกรณ์และภาชนะบรรจุ ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาและประยุกต์ใช้อิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบเจลหรือไฮโดรเจล แทนสารละลาย เนื่องจากเจลอิเล็กโทรไลต์มีข้อดีหลายประการ เช่น ความปลอดภัยที่สูงขึ้น การลดการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ ความยืดหยุ่น และความสามารถในการออกแบบเพื่อให้มีคุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ สำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าและการเก็บพลังงาน เช่น (Sosa et al., 2023) ประยุกต์ใช้เจลาติน เกลือ และซึนโลหะ สร้าง pH meter ต้นทุนต่ำ มาใช้ศึกษาหลักการพื้นฐานของอินดิเคเตอร์อิเล็กโทรดเพื่อเป็นตัวอย่างทั้งการวิเคราะห์โพเทนซิโอเมตริกโดยตรงและการไทเทรตโพเทนซิโอเมตริก (การวิเคราะห์ทางอ้อม) และการศึกษาของ Fogde et al. (2020) ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์จากสารละลายเกลือผสมอินดิเคเตอร์ ธรรมชาติ และคาร์ราจีแนนเพื่อทำให้เกิดเจล นำมาทดลองเรื่องการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นการบูรณาการเนื้อหาที่หลากหลายซึ่งเป็นอีกหนทางเลือกในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้และสามารถลดของเสียจากห้องปฏิบัติการได้ รวมถึง จะเห็นได้ว่าสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำ มีความโปร่งใส ความคงตัวสูง อีกทั้งสมบัติเป็น Thermoreversible gel ที่สามารถเปลี่ยนกลับมาเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน เหมาะสำหรับการนำของเสียมาใช้ใหม่

ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการใช้สารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ เช่น วุ้น (Agar) คาร์ราจีแนน (Carrageenan) และเจลาติน (Gelatin) ผสมสารละลายให้อยู่ในรูปแบบเจลอิเล็กโทรไลต์ นำมาประยุกต์ ใช้สร้างชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่าย การวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละประเภท การสร้างแบตเตอรี่อย่างง่ายจากเซลล์กัลวานิกที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ การหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้นใหม่โดยประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานที่จ่ายไฟฟ้าในการทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งประกอบด้วย การหาประสิทธิภาพของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และการหาประสิทธิภาพของการทำโลหะให้บริสุทธิ์ การใช้เจลอิเล็กโทรไลต์จะช่วยลดการใช้สารเคมีที่มีความเข้มข้นสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และบูรณาการเนื้อหาเพื่อให้เข้าใจความรู้พื้นฐานและนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในชีวิตจริง อีกทั้งสามารถต่อยอดความรู้ขั้นสูงเพื่อใช้ในระดับอุดมศึกษาต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกที่เตรียมจากเจลอิเล็กโทรไลต์
2. เพื่อประยุกต์ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์สร้างแบตเตอรี่อย่างง่ายและศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้น
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์

สมมติฐานของการวิจัย

1. ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกที่เตรียมจากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์มีความคงทนมากกว่า 6 ชั่วโมง
2. แบตเตอรี่เจลลี่อิเล็กโทรไลต์ความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 6 ชั่วโมง
3. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์มีผลได้ร้อยละมากกว่าการชุบโดยใช้ถ่านไฟฉาย
4. การทำโลหะให้บริสุทธิ์ที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์มีผลได้ร้อยละมากกว่าการชุบโดยใช้ถ่านไฟฉาย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เซลล์กัลวานิกที่เตรียมจากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์มีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้า และนำกลับมาใช้ใหม่ได้
2. การสร้างแบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ สามารถลดของเสียอันตรายจากสารละลายเข้มข้นสูงที่ใช้ในการทดลองแบบปกติในห้องเรียนได้ และลดการใช้ถ่านไฟฉายในห้องปฏิบัติการ
3. การทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์โดยใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์สามารถใช้เป็นชุดการทดลองอย่างง่ายเพื่อใช้ในการศึกษาการชุบโลหะและการทำโลหะให้บริสุทธิ์ได้

ขอบเขตการวิจัย

1. การศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกที่เตรียมจากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ระหว่างครึ่งเซลล์ $Zn(s) | Zn^{2+}(gel)$ กับ $Cu(s) | Cu^{2+}(gel)$ โดยใช้ความเข้มข้นของ $CuSO_4$ และ $ZnSO_4$ เป็น 1.0 mol/L ซึ่งเตรียมเจลลี่อิเล็กโทรไลต์จากวุ้น (Agar) ผสมคาร์ราจีแนน (Carrageenan) คาร์ราจีแนน (Carrageenan) และเจลาติน (Gelatin) โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 360 นาที
2. การศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่สร้างจากการต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างครึ่งเซลล์ $Zn(s) | Zn^{2+}(gel)$ กับ $Cu(s) | Cu^{2+}(gel)$ โดยใช้ความเข้มข้นของ $CuSO_4$ และ $ZnSO_4$ เป็น 0.10 mol/L ผสมคาร์ราจีแนน (Carrageenan) ต่อย่างจบกัแบบอนุกรม จำนวน 6 คู่ โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 360 นาที
3. การศึกษาประสิทธิภาพของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ ในการชุบตะปูเหล็กด้วยสังกะสี เป็นเวลา 5 นาที โดยชั่งน้ำหนักของโลหะก่อน - หลังการชุบ คำนวณค่าที่ได้เทียบกับค่าทางทฤษฎี และเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับการใช้ถ่านไฟฉายเป็นแบตเตอรี่
4. การศึกษาประสิทธิภาพของการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ ในการแยกสังกะสีออกจากแผ่นเมทัลซีท (AZ70 อลูมิเนียม 0.23 มม.) เป็นเวลา

10 นาที โดยชั่งน้ำหนักของโลหะก่อน – หลังการทดลอง คำนวณหาผลได้ร้อยละ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการใช้ถ่านไฟฉาย

นิยามศัพท์เฉพาะ

เจลลี่อิเล็กโทรไลต์ หมายถึง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 , ZnSO_4 ที่ให้ความร้อน แล้วเติมสารที่ทำให้เกิดเจล (hydrocolloid) ได้แก่ วุ้น (Agar) คาร์ราจีแนน (Carrageenan) เจลาติน (Gelatin) และทำให้แข็งตัว ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม มีสมบัติ Thermoreversible gel เปลี่ยนกลับเป็นของเหลวเมื่อได้รับความร้อน เพื่อใช้แทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ความคงทน หมายถึง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเซลล์กัลวานิกหรือแบตเตอรี่ที่เตรียมจากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์มีค่าคงที่เมื่อผ่านไป 6 ชั่วโมง

แบตเตอรี่ หมายถึง การต่อเซลล์กัลวานิกเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ระหว่างครึ่งเซลล์ $\text{Zn(s)}|\text{Zn}^{2+}(\text{gel})$ กับ $\text{Cu(s)}|\text{Cu}^{2+}(\text{gel})$ จำนวน 6 คู่ ด้วยวงจรแบบอนุกรม เพื่อเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนถ่านไฟฉาย

การทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลติก หมายถึง การทดลองชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การทำโลหะให้บริสุทธิ์ โดยใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

ประสิทธิภาพการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การเปรียบเทียบน้ำหนักของโลหะที่ได้จากการชุบด้วยไฟฟ้า ในการชุบตะปูเหล็กด้วยสังกะสีกับค่าทางทฤษฎีตามกฎฟาราเดย์

ประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ หมายถึง การเปรียบเทียบการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าในการแยกสังกะสีออกจากแผ่นเมทัลซีท (AZ70 อลูมิเนียม 0.23 มม.) และคำนวณหาผลได้ร้อยละ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง ชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่ายที่ทำจากเจลอิเล็กโทรไลต์ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย

1. เคมีไฟฟ้า
2. การศึกษาเกี่ยวกับชุดการทดลองไฟฟ้าเคมี
3. สารไฮดรอกไซด์
 - 3.1 คาร์ราจีแนน
 - 3.2 วุ้น
 - 3.3 เจลาติน
4. การศึกษาเกี่ยวกับเจลอิเล็กโทรไลต์กับการศึกษาเคมีไฟฟ้า
5. การศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบตเตอรี่อย่างง่าย
6. การศึกษาเกี่ยวกับการชุบด้วยไฟฟ้าและการทำโลหะให้บริสุทธิ์

1. เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)

เคมีไฟฟ้าเป็นสาขาหนึ่งของเคมีฟิสิกส์และเคมีวิเคราะห์ที่เน้นการเชื่อมโยงระหว่างผลกระทบทงไฟฟ้าและเคมี โดยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (ซึ่งสามารถวัดได้และเป็นตัวบ่งชี้เชิงปริมาณ) และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือในทางกลับกันเคมีไฟฟ้าครอบคลุมปรากฏการณ์หลายประเภท เช่น การกัดกร่อนและการอิเล็กโทรโพริซีส รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เซ็นเซอร์ แบตเตอรี่ และเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) เคมีไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในหลาย ๆ ด้านของเคมี เช่น การวิเคราะห์ การสังเคราะห์ อุณหพลศาสตร์และจลนพลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงพลังงาน การขนส่งอิเล็กตรอนในระบบชีวภาพ การสื่อสารทางประสาท และการนำสัญญาณประสาท เซลล์ไฟฟ้าเคมีพบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ AA ที่ใช้ในรีโมทคอนโทรล แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ในโทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่ที่เก็บพลังงานไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า เซลล์ประสาทในร่างกาย และเซ็นเซอร์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบระดับกลูโคส เซลล์ไฟฟ้าเคมีมักประกอบด้วยอิเล็กโทรดสองขั้วหรือมากกว่าที่ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงระหว่างระบบเคมีกับระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดหรือควบคุมพารามิเตอร์ไฟฟ้า เช่น แรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ โดยประเภทของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งได้เป็นเซลล์กัลวานิกและเซลล์อิเล็กโทรไลต์

เซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไปประกอบด้วยอิเล็กโทรดอย่างน้อยสองขั้วที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์อย่างน้อยหนึ่งชนิด ซึ่งเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนในตัวทำละลาย ตัวอย่างในภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบด้วยสองครึ่งเซลล์ ได้แก่

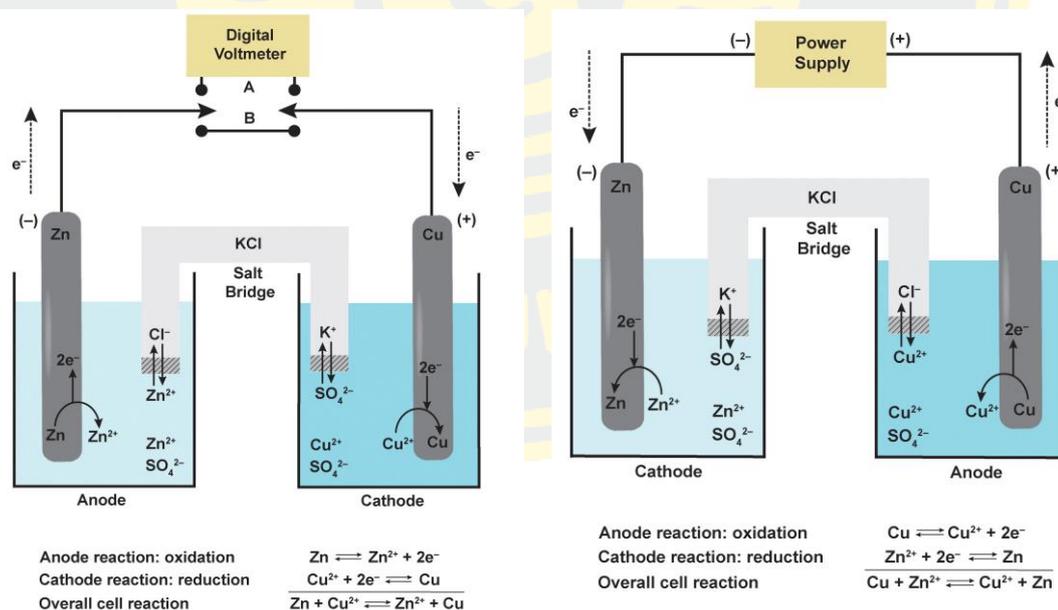
(1) อิเล็กโทรดสังกะสีในสารละลาย ZnSO_4

(2) อิเล็กโทรดทองแดงในสารละลาย CuSO_4

อิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า แอโนด และอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกว่า แคโทด ปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดเป็นผลรวมของปฏิกิริยาครึ่งเซลล์สองครึ่งเซลล์ อิเล็กโทรไลต์ (ในที่นี้คือ ZnSO_4 และ CuSO_4) ทำหน้าที่นำไฟฟ้าผ่านการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายแต่ละครึ่งเซลล์ สะพานเกลือที่มีสารละลาย KCl เข้มข้นเชื่อมต่อกับสารละลายซัลเฟตทั้งสองในหลอด โดยที่ปลายหลอดมีฟริตที่มีรูพรุนซึ่งช่วยให้ไอออนเคลื่อนที่ได้ แต่ป้องกันไม่ให้สารในหลอดรั่วออกไป สะพานเกลือมีวัตถุประสงค์หลักสองอย่าง คือ

(1) เพื่อให้ครบวงจรโดยผ่านการนำไฟฟ้าของไอออนระหว่างอิเล็กโทรไลต์ใน 2 ส่วน

(2) เพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองผสมกัน วงจรภายนอกที่เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดทั้งสองรวมถึงมิเตอร์, โหลด, หรือสายไฟ



(ก) เซลล์กัลวานิก

(ข) เซลล์อิเล็กโทรไลติก

ภาพที่ 1 ประเภทเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ที่มา : *Techniques in Electroanalytical Chemistry* (9), โดย Simoska, O., & Minteer, S. D. (2021). [doi:10.1021/acsinfocus.7e5021]. American Chemical Society.

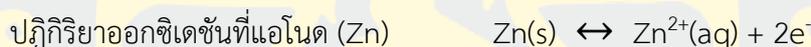
ในรูปที่ 1 (ก) อิเล็กโทรดจะถูกต่อเข้ากับสายไฟที่เชื่อมต่อกับดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ (ตำแหน่ง A) หรือเชื่อมต่อกันเอง (ตำแหน่ง B) ซึ่งสมบูรณ์วงจรไฟฟ้าสำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมี เซลล์นี้ประกอบด้วย

(1) การแยกสารด้วยไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว (การแยกสารด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่กระแสไฟฟ้าถูกส่งผ่านสารและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี)

(2) การไหลของอิเล็กตรอนผ่านสายไฟ

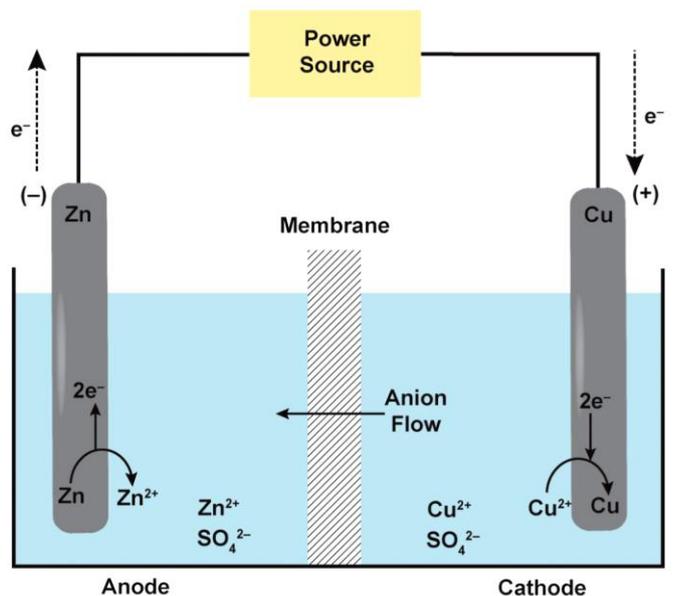
(3) การเคลื่อนที่ของไอออนผ่านสะพานเกลือ

ในตัวอย่างนี้ เซลล์ไฟฟ้าเคมีทำงานเป็นเซลล์กัลวานิกเพราะปล่อยพลังงานออกมาอย่างอิสระ ดังนั้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจึงมีค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs free energy) ที่มีค่าเป็นลบและศักย์ไฟฟ้าเซลล์ที่มีค่าเป็นบวก ในเซลล์นี้ ปฏิกิริยาทั้งหมดคือการรีดักชันของ Cu^{2+} ไปเป็นทองแดงโลหะโดยสังกะสี ซึ่งถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Zn^{2+} สังกะสีเป็นสารรีดิวซ์ในปฏิกิริยารีดอกซ์เพราะสังกะสีรีดิวซ์ Cu^{2+} ให้เป็น Cu ในทางกลับกัน Cu^{2+} เป็นสารออกซิไดซ์เพราะ Cu^{2+} ออกซิไดซ์สังกะสีไปเป็น Zn^{2+} ดังสมการ



ในภาพที่ 1 (ข) แสดงเซลล์ไฟฟ้าอิเล็กโทรไลติกซึ่งมีปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการพลังงาน (endergonic chemical reaction) อิเล็กโทรดเชื่อมต่อกับแหล่งพลังงานภายนอก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเคมีรวมในทิศทางตรงกันข้ามกับที่สังเกตในเซลล์กัลวานิก กล่าวคือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ไม่เกิดขึ้นอย่างอิสระ ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมจึงต้องใช้แหล่งพลังงานภายนอก ในกรณีนี้ พลังงานจะถูกเก็บไว้ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีและสามารถปล่อยออกมาเมื่อเซลล์ทำงานในโหมดกัลวานิก ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีนี้ อิเล็กโทรดทองแดง (Cu) จะทำหน้าที่เป็นแอโนดเพราะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่นั่น ขณะที่อิเล็กโทรดสังกะสี (Zn) จะทำหน้าที่เป็นแคโทดเพราะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่นั่น เซลล์ไฟฟ้าเคมีนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งจะขับเคลื่อนปฏิกิริยาให้เกิดขึ้น

ในปัจจุบันเซลล์ไฟฟ้าเคมีไม่นิยมใช้สะพานเกลือ จะใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนที่ให้การขนส่งไอออนเฉพาะระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง (ภาพที่ 2) นอกจากนี้ เคมีไฟฟ้าออร์แกนิกและเทคโนโลยีแบตเตอรี่บางชนิดมักใช้เยื่อที่มีรูพรุนซึ่งช่วยให้การถ่ายโอนไอออนระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองรวมถึงการขนส่งโมเลกุลอื่น ๆ ในสารละลาย (Simoska & Minteer, 2021)



ภาพที่ 2 เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน

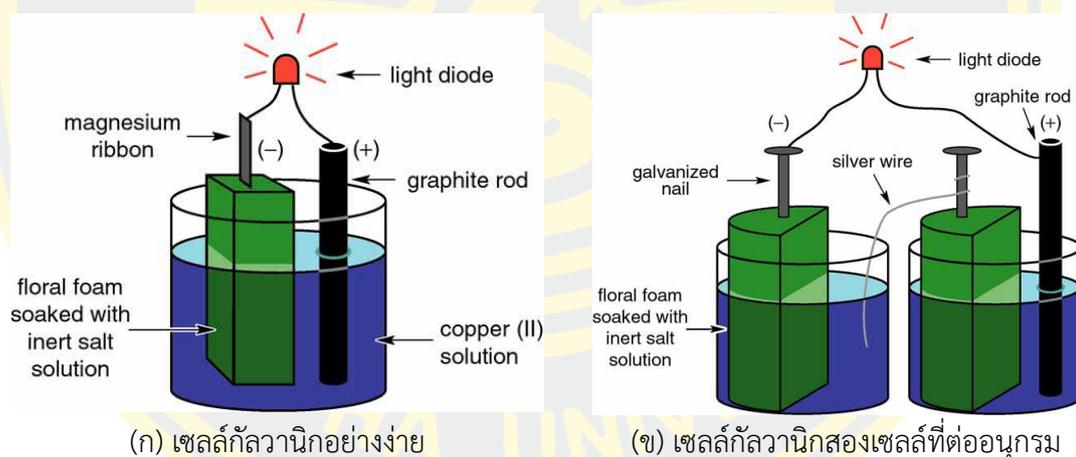
ที่มา : *Techniques in Electroanalytical Chemistry* (11), โดย Simoska, O., & Minter, S. D. (2021). [doi:10.1021/acsinfocus.7e5021]. American Chemical Society.

2. การศึกษาเกี่ยวกับชุดการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมี

การเรียนการสอนเกี่ยวกับเซลล์ไฟฟ้าเคมีในระดับมัธยมศึกษายังมีความท้าทายหลายประการ นักเรียนมักพบความยากลำบากในการทำ ความเข้าใจหลักการของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิกและเซลล์อิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้การออกแบบและดำเนินกิจกรรมการทดลองที่สามารถทำให้นักเรียนเข้าใจหลักการเหล่านี้ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ยังคงเป็นประเด็นที่ต้องได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่มีการออกแบบให้เหมาะสมกับการเรียนรู้ของนักเรียนในระดับมัธยมศึกษา เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยเสริมสร้างความเข้าใจของนักเรียนได้ดียิ่งขึ้น โดยการออกแบบชุดการทดลองที่เน้นให้ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติจริง (hands-on) ผ่านกระบวนการทดลองและการแก้ปัญหา ชุดการทดลองนี้ไม่เพียงแต่จะทำให้ นักเรียนสามารถเข้าใจทฤษฎีเคมีไฟฟ้าได้อย่างลึกซึ้ง แต่ยังช่วยพัฒนาทักษะด้านการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหาเชิงวิทยาศาสตร์ซึ่งเป็นทักษะที่สำคัญในศตวรรษที่ 21 ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยดังนี้

Grønneberg et al. (2006) สร้างเซลล์กัลวานิกได้อย่างง่ายโดยใช้วัสดุราคาไม่แพง ดังภาพที่ 3 (ก) ประกอบด้วยลวดแมกนีเซียม (อิเล็กโทรดลบ) ในสารละลายเกลือกลาง (โซเดียมซัลเฟต) ยึดเข้าที่ด้วยโฟมดอกไม้และอิเล็กโทรดเฉื่อย (แท่งกราไฟต์ อิเล็กโทรดบวก) ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต อิเล็กโทรดเชื่อมต่อกับไดโอดแสง ทำให้สามารถเข้าถึงวัตถุประสงค์ที่เน้นว่านักเรียนควรมีส่วนร่วมใน

การสร้างอุปกรณ์ของตนเองเพื่อปรับปรุงการเรียนรู้ อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นช่วยแก้ไขความเข้าใจผิดทั่วไปในเคมีไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าและกระแสด้วยการทำให้การออกแบบง่ายขึ้นและหลีกเลี่ยงส่วนประกอบที่ซับซ้อน เช่น สะพานเกลือและส่วนที่ซับซ้อนของเซลล์แบบดั้งเดิมสามารถเข้าใจแนวคิดพื้นฐานของเซลล์กัลวานิกได้ดีขึ้น เซลล์แสดงให้เห็นได้อย่างมีประสิทธิภาพว่าพลังงานไฟฟ้าเกิดจากปฏิกิริยาเคมีไดโอดเรืองแสงทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้ที่ชัดเจนของการแปลงพลังงานนี้ ทำให้สามารถเชื่อมต่อกับกระบวนการทางเคมีด้วยสายตากับเอาต์พุตไฟฟ้า ในภาพที่ 3 (ก) การใช้วัสดุเฉื่อย เช่น ลวดเงินหรือแท่งกราไฟต์แทนอิเล็กโทรดแบบดั้งเดิม อิเล็กโทรดลบในแต่ละเซลล์เป็นตะปูชุบสังกะสีในสารละลายเกลือเป็นกลาง (โซเดียมซัลเฟต) ยึดเข้าที่ด้วยโฟมดอกไม้ อิเล็กโทรดบวกเป็นลวดเงิน (ซ่าย) และแท่งกราไฟต์ (ขวา) อิเล็กโทรดบวกทั้งสองจุ่มอยู่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่อไดโอดทำให่วงจรสมบูรณ์ ซึ่งการจัดชุดการทดลองนี้ช่วยให้สามารถสังเกตได้สะสมทองแดง ช่วยในการทำความเข้าใจกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน ทางเลือกของวัสดุนี้ยังก่อให้เกิดความเรียบง่ายและความปลอดภัยของการทดลอง



(ก) เซลล์กัลวานิกอย่างง่าย

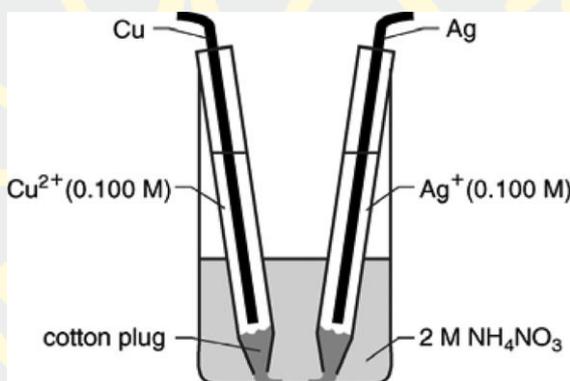
(ข) เซลล์กัลวานิกสองเซลล์ที่ต่ออนุกรม

ภาพที่ 3 ชุดทดลองเซลล์กัลวานิกจากโฟมดอกไม้

ที่มา : “Small-Scale and Low-Cost Galvanic Cells,” โดย Grønneberg, T., Kvittingen, L., & Eggen, P.-O., 2006, *Journal of Chemical Education*, 83(8), หน้า 1201.

เซลล์ที่สร้างขึ้นผลิตแรงดันและกระแสไฟเพียงพอที่จะส่องสว่างไดโอดไฟ แสดงให้เห็นถึงการทำงานของแบตเตอรี่ นอกจากนี้การอธิบายการจัดอุปกรณ์สำหรับทั้งเซลล์เดี่ยวและหลายเซลล์ บ่งชี้ว่านักเรียนสามารถสร้างแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยเชื่อมต่อเซลล์เพิ่มเติมในชุด โดยรวมแล้วผลลัพธ์บ่งชี้ว่าเซลล์กัลวานิกขนาดเล็กเหล่านี้เป็นเครื่องมือทางการศึกษาที่มีประสิทธิภาพซึ่งช่วยเพิ่มความเข้าใจของนักเรียนเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้าในขณะที่ปลอดภัยและง่ายต่อการสร้าง

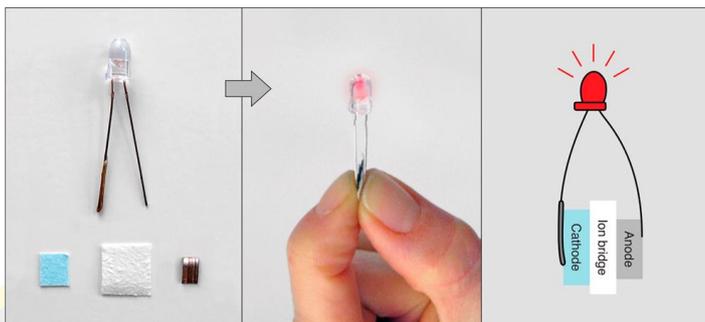
Brosmer and Peters (2012) ออกแบบเซลล์กัลวานิกขนาดเล็กที่สร้างโดยนักเรียน ดังภาพที่ 4 สามารถศึกษาหัวข้อเซลล์กัลวานิกแบบง่ายและการวัดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ เซลล์ที่ใช้ในการกำหนดผลิตภัณฑ์ของการละลายหรือค่าคงที่ของการก่อตัวโดยรวม การใช้เซลล์กัลวานิก (ความเข้มข้น) เพื่อกำหนดความเข้มข้นของ Ag^+ ในสารที่ไม่ทราบค่า ค่าที่ได้ตรงกับที่ค่าทางทฤษฎีที่คำนวณจากสมการ Nernst การทดลองนี้แสดงหลักการทางเคมีไฟฟ้า นักเรียนสามารถมีส่วนร่วมและลงมือปฏิบัติกับวัสดุ อุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเข้าใจสมดุลทางเคมีพื้นฐานผ่านประสบการณ์จริงกับเซลล์ขนาดเล็กกัลวานิก ผลการวิจัยเน้นถึงประสิทธิภาพของเซลล์ขนาดเล็กกัลวานิกในฐานะเครื่องมือการสอนในการศึกษาเคมี โดยให้ข้อมูลที่เชื่อถือได้สำหรับทั้งผลิตภัณฑ์ความสามารถในการละลายและค่าคงที่การก่อตัวในขณะที่เพิ่มความเข้าใจของนักเรียนเกี่ยวกับแนวคิดทางเคมีไฟฟ้า



ภาพที่ 4 การสร้างเซลล์กัลวานิกขนาดเล็ก

ที่มา : “Galvanic Cells and the Determination of Equilibrium Constants.” โดย Brosmer, J. L., & Peters, D. G., 2012, *Journal of Chemical Education*, 89(6), หน้า 763-766.

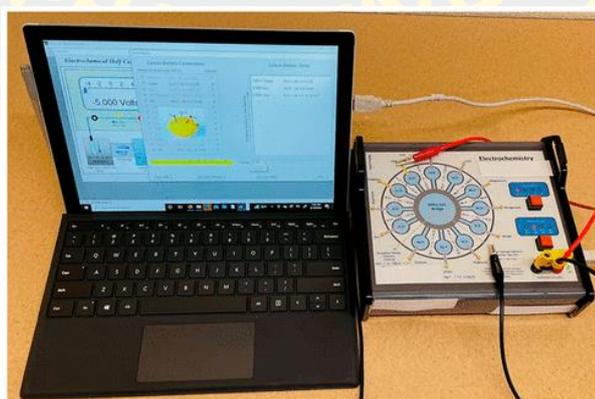
Eggen and Skaugrud (2015) การทดลองเซลล์กัลวานิกอย่างง่ายซึ่งนักเรียนประกอบเซลล์ที่ทำงานโดยใช้ลวดแมกนีเซียม กระดาษกรองแช่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟต และ LED สีแดงเพื่อทดสอบการทำงานของเซลล์ ส่วนประกอบของเซลล์ประกอบโดยการแช่กระดาษกรองในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟต ทำให้แห้งและตัดเป็นชิ้น ๆ พร้อมกับใช้ลวดแมกนีเซียมหนึ่งชิ้น ขั้วบวกของ LED เคลือบด้วยกาวนำไฟฟ้าเพื่อป้องกันปฏิกิริยากับคอปเปอร์ซัลเฟตและเซลล์จะถูกประกอบโดยเชื่อมต่อขั้วบวกกับแคโทดและขั้วลบกับขั้วบวก ดังภาพที่ 5 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของส่วนประกอบของแบตเตอรี่ สร้างเซลล์ และทดสอบด้วย LED ภายในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 5 เซลล์กัลวานิกอย่างง่าย 3 ส่วน

ที่มา : “An Easy-To-Assemble Three-Part Galvanic Cell,” โดย Eggen, P.-O., & Skaugrud, B., 2015, *Journal of Chemical Education*, 92(6), หน้า 1053-1055.

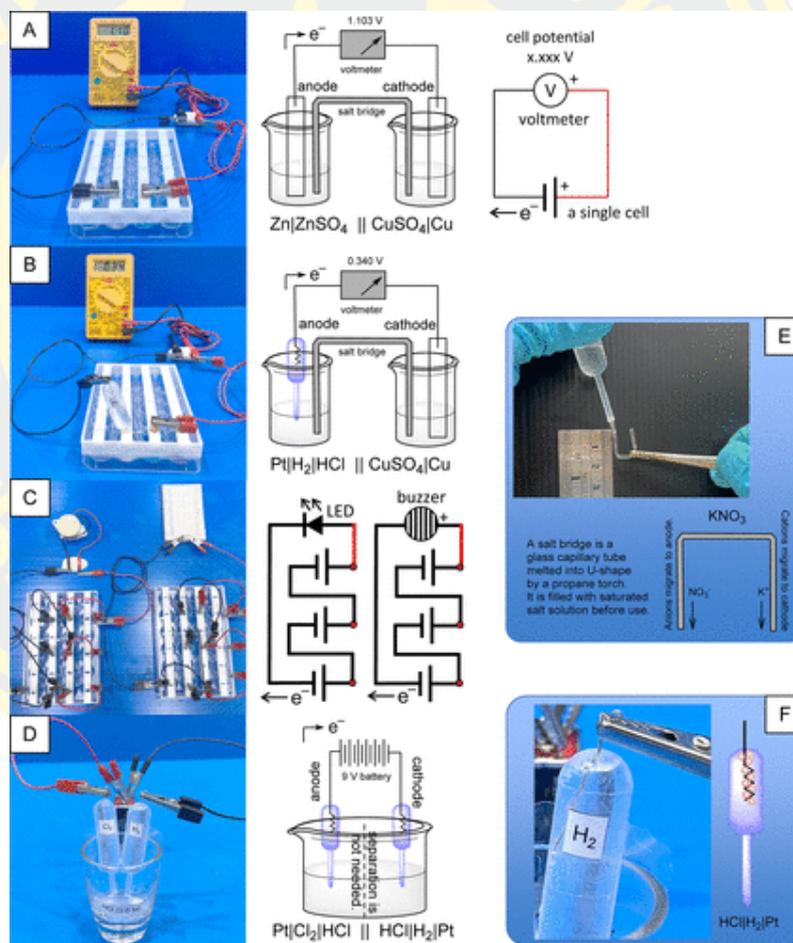
Arnold and Kyasa (2023) ออกแบบโมดูลครึ่งเซลล์อิเล็กโทรอนิกส์ที่ซื้อมาในเชิงพาณิชย์ เพื่อจำลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีโมดูลนี้ประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีจำลอง 14 เซลล์ เช่น อิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE) และอิเล็กโทรดอ้างอิง AgCl/Ag ช่วยให้สามารถทดลองโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายทำให้เหมาะสำหรับการสาธิตระยะไกล สามารถจำลองอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (เช่น 5, 25, 45 และ 65 °C) และความเข้มข้นของสารละลาย (เช่น 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 M) คลิปจระเข้ใช้เพื่อเชื่อมต่ออิเล็กโทรดที่เลือก ทำให้สามารถตั้งค่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน โมดูลได้รับการออกแบบมาเพื่อคำนวณค่า E° เซลล์ด้วยอิเล็กโทรนิกส์โดยใช้สูตร $E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ_{\text{Cathode}} - E^\circ_{\text{Anode}}$ การทดลองยังรวมถึงชุดแบตเตอรี่ผลไม้รสเปรี้ยว ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ผลไม้รสเปรี้ยวจริงหรือเสมือนเพื่อสังเกตปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โมดูลครึ่งเซลล์อิเล็กโทรนิกส์

ที่มา : “Electronic Half-Cell Module to Demonstrate an Electrochemical Series and a Citrus Fruit Battery for Remote Students,” โดย Arnold, N. A., & Kyasa, S. K., 2023, *Journal of Chemical Education*, 100(9), หน้า 3739-3743.

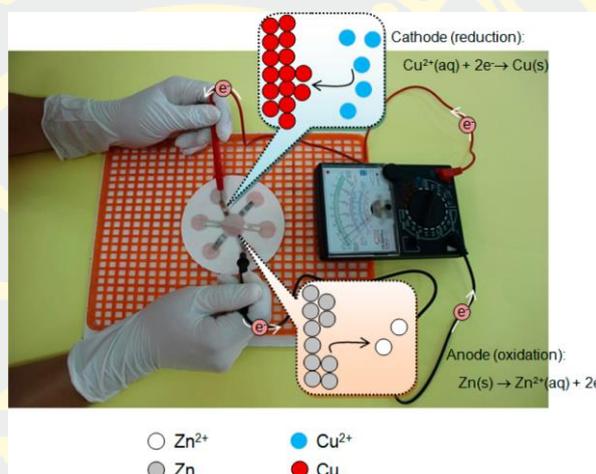
Intaraprasit et al. (2023) ออกแบบการทดลองเคมีไฟฟ้าอย่างง่าย โดยมีการทดลองดังภาพที่ 7 ส่วน A เกี่ยวข้องกับการจัดอุปกรณ์เซลล์ Daniell อย่างง่ายพร้อมอิเล็กโทรดสังกะสีและทองแดงเพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิก ส่วน B มุ่งเน้นไปที่การวัดศักย์ไฟฟ้ารีดักชันครึ่งเซลล์มาตรฐานโดยใช้อิเล็กโทรดไฮโดรเจน ส่วน C แสดงให้เห็นถึงการรวมกันของเซลล์ในวงจรอนุกรมเพื่อจ่ายไฟ LED หรือเสียงเบนเซอร์ และสามารถเตรียมอิเล็กโทรดแก๊ส 2 ชนิด (คลอรีนและไฮโดรเจน) ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (ส่วน D) การทดลองนี้ใช้แผ่นเพาะเลี้ยงเซลล์ 24 หลุมและโครงสร้างที่พิมพ์ 3D ซึ่งทำให้การวางอุปกรณ์ใช้งานง่ายและกะทัดรัด การใช้หลอดฮีมาโตคริตแก้วเป็นสะพานเกลือมีความทนทานและใช้งานง่าย ส่วนสารละลายใส่ในปิเปตป้องกันการล้นวงจร



ภาพที่ 7 การออกแบบชุดการทดลองเคมีไฟฟ้าอย่างง่าย

ที่มา : “Intuitive Small-Scale Electrochemistry on 24-Well Plate and 3D-Printed Cover Yielding Accurate Results.” โดย Intaraprasit, M., Tawornparcha, P., Veerapong, P., & Limpanuparb, T., 2023, *Journal of Chemical Education*, 100(8), หน้า 3144-3150.

Chatmontree et al. (2015) ออกแบบเซลล์กัลวานิกโดยใช้อุปกรณ์ที่ใช้กระดาษกรอง ซึ่ฝัง
 ซึ่ฝัง โลหะ และสารละลายของไอออนโลหะ เช่น Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} ฯลฯ วัดศักยภาพของเซลล์ใช้
 มัลติมิเตอร์เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ดังภาพที่ 8 แต่ละโซนวงกลมของช่องกระจายทั้งหกช่องจะถูก
 เพิ่มด้วยสารละลายไอออนโลหะที่สอดคล้องกับซึ่ฝังโลหะ (เช่น สารละลาย CuSO_4 บนแถบซึ่ฝัง Cu
 เป็นต้น) จากนั้นจึงหยดจุดศูนย์กลางของเซลล์กัลวานิกแบบกระดาษลงในสารละลาย KNO_3 ความ
 เข้มข้น 1.0 M เพื่อทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือบนกระดาษกรองที่เชื่อมต่อเซลล์ครึ่งหนึ่ง การสร้างเซลล์
 กัลวานิกอย่างง่ายและมีราคาประหยัดด้วยอุปกรณ์ที่ใช้กระดาษ ค่าศักย์ไฟฟ้ามีความแตกต่างเล็กน้อย
 กับค่าทางทฤษฎี



ภาพที่ 8 เซลล์กัลวานิกโดยใช้กระดาษ

ที่มา : “Student Fabrication and Use of Simple, Low-Cost, Paper-Based Galvanic Cells To Investigate Electrochemistry.” โดย Chatmontree, A., Chairam, S., Supasorn, S., Amatongchai, M., Jarujamrus, P., Tamuang, S., & Somsook, E., 2015, *Journal of Chemical Education*, 92(6), หน้า 1044-1048.

Toma (2021) จัดทำชุดการทดลองวิทยาศาสตร์ออกแบบการทดลองขนาดเล็ก โดยคำนึงถึง
 ความปลอดภัย การพกพา ประสิทธิภาพ และต้นทุนต่ำ มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มทักษะและความสนใจของ
 นักเรียนในวิทยาศาสตร์ ในหัวข้อการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้เปอร์แมนังกาเนตไอออนในสารละลาย
 ที่เป็นกรดแอสคอร์บิก หรือเหล็ก(II)ซัลเฟตเป็นตัวรีดิวซ์ เพื่อสังเกตการสลายตัวของสีแดง-ม่วงของ
 ต่างทับทิม การทดลองเพื่อศึกษาสมการของเนิร์ส ใช้ลวดทองแดงซึ่ฝังเล็กๆ ใส่ลงในสารละลายที่มี
 AgNO_3 ในปริมาณน้อยที่สุด และใส่ลวดแมกนีเซียมซึ่ฝังเล็กๆ ลงในสารละลายที่เป็นกรด โดยใช้เพื่อ
 สังเกตและรวบรวมแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น และการทดลองเพื่อศึกษาเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่าง Mg/Cu

โดยใช้สารละลาย NaCl 1 mL และ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ในหลอดขนาดเล็ก และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยมัลติมิเตอร์ จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองใช้งานง่ายและสามารถสร้างแรงบันดาลใจในการพัฒนากลยุทธ์การสอนและการทดลองเพิ่มเติม เช่น การผสมผสานกับเคมีในครัว โดยใช้ผลิตภัณฑ์และวัสดุที่หาได้ง่าย

จากการศึกษาการออกแบบชุดทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยมีข้อสรุปได้ว่าการออกแบบโดยใช้วัสดุที่ง่ายและปลอดภัย ช่วยให้นักเรียนสามารถมีส่วนร่วมในการเรียนรู้ได้มากขึ้น ชุดทดลองที่ออกแบบมาเพื่อให้ผู้เรียนสร้างอุปกรณ์ด้วยตนเอง ช่วยเสริมสร้างความเข้าใจในแนวคิดทางเคมีไฟฟ้า เช่น การทำงานของเซลล์กัลวานิกและแบตเตอรี่ ผ่านการแก้ไขความเข้าใจผิดในกระบวนการทดลอง และบางครั้งวัสดุที่ใช้ในการออกแบบอาจมีข้อจำกัด เช่น วัสดุเหนียวที่อาจไม่ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ หรือการใช้สารเคมีบางชนิดที่ต้องการความระมัดระวังในการจัดการ ทำให้เกิดความยุ่งยากในการปฏิบัติ การควบคุมปัจจัยต่างๆ อย่างละเอียดอาจทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่ตรงตามคาดหวัง หากไม่มีความเข้าใจที่เพียงพอในการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ อุปกรณ์วัดค่าต่างๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้า อาจมีข้อจำกัดในการวัดผลที่แม่นยำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของข้อมูลและการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับทฤษฎี เพื่อพัฒนาชุดทดลองทางไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ควรให้ความสำคัญในด้านต่อไปนี้:

1. การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม: ปรับปรุงวัสดุที่ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและเพิ่มความแม่นยำในการทดลอง
2. การควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลอง: พัฒนาการควบคุมและตรวจสอบปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการทดลองให้ละเอียดขึ้น เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น
3. การออกแบบอุปกรณ์ที่ง่ายต่อการใช้งาน: การออกแบบอุปกรณ์ที่มีความกะทัดรัดและง่ายต่อการประกอบ รวมถึงการใช้เทคโนโลยีเช่น 3D printing เพื่อสร้างชิ้นส่วนที่มีความแม่นยำสูง ช่วยให้การทดลองสามารถดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ความปลอดภัยในการทดลอง: พัฒนามาตรการความปลอดภัยในการจัดการสารเคมีที่มีความเข้มข้นสูงและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง

โดยสรุปการศึกษาและออกแบบชุดทดลองทางไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการเสริมสร้างความเข้าใจในแนวคิดทางไฟฟ้าและเคมีไฟฟ้า โดยเฉพาะในระดับการศึกษาเบื้องต้น ชุดทดลองเหล่านี้ช่วยให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ผ่านการปฏิบัติจริง ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง

3. ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids)

ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) คือ โพลีเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่ได้จากพืช สัตว์ จุลินทรีย์ รวมถึงโพลีเมอร์ดัดแปรจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ โดยทั่วไปจะเป็นโมเลกุลที่มี น้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และอาจจะเป็น Polyelectrolyte อื่น ๆ โพลีเมอร์เหล่านี้จะแสดงหน้าที่ที่สำคัญในอาหาร เช่น เป็นสารให้ความหนืด ทำให้เกิดเจลเป็น อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) และเป็นสารที่ทำให้เกิดความคงตัว เป็นต้น ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มตามแหล่งที่มา

1) ไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้มาจากธรรมชาติ (Natural Hydrocolloids) ซึ่งได้จากส่วน ต่างๆของพืชได้แก่เมล็ด ยาง เช่น โลคัสบีนกันัม, กัมอาราบิก ราก ลำต้น เช่น แป้ง หรือได้จาก สาหร่ายทะเล เช่น คาร์ราจีแนน (Carrageenan) หรือได้จากสัตว์ เช่น ไคติน (Chitin) หรือจาก กระบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์ เช่น แชนแทนกัม (Xanthan Gum)

2) ไฮโดรคอลลอยด์ที่ดัดแปรจากสารที่ได้จากธรรมชาติ (Modified Natural Hydrocolloids) ได้แก่อนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น Carboxymethyl Cellulose (CMC)

3) ไฮโดรคอลลอยด์สังเคราะห์ (Synthetic Hydrocolloids) เช่น โพลีเอธิลีนออกไซด์โพลีเมอร์ (Polyethylene Oxide Polymers)

ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีลักษณะโครงสร้างที่ต่างกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกันดังนี้

1) โครงสร้างโพลีเมอร์แบบเชิงเส้น (Linear) เมื่อละลายน้ำหรือกระจายตัวจะให้ความหนืดสูง เกิดเจลและคืนตัว (Retrogradation) ได้ง่าย เช่น Agar, Alginate, Cellulose และ Pectin

2) โครงสร้างโพลีเมอร์แบบเชิงเส้นที่มีสายกิ่งก้าน (Linear With Side Chains) ให้ความหนืดสูง ปกติไม่เกิดเจล แต่จะเกิดเจลได้เมื่ออยู่ร่วมกับสารประกอบอื่นในสภาวะที่เหมาะสม เช่น Guar gum และ Locust bean gum

3) โครงสร้างโพลีเมอร์แบบมีกิ่งก้าน (Branched Chains) ให้ความหนืดต่ำและคงตัวดี ไม่เกิดเจล มีความเหนียว เช่น Gum Arabic

3.1 คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

คาร์ราจีแนน (Carrageenan) ได้จากสาหร่ายทะเล (Seaweed หรือ Marine algae) ซึ่งเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสารเจล (Gelling agent) คาร์ราจีแนนสามารถสกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Red seaweed) *Rhodophyceae* เช่น สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*) คาร์ราจีแนนเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประเภทเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) มี น้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นพอลิเมอร์ของกาแล็กโทส (Galactose) และ 3,6 -Anhydrogalactose

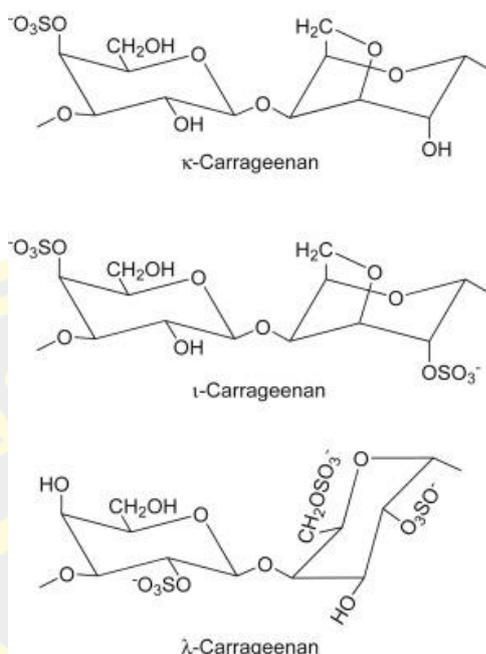
(3,6-AG) มีทั้งชนิดที่มีหมู่ซัลเฟต และไม่มีหมู่ซัลเฟตซึ่งทำให้คาร์ราจีแนน มีสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น การละลาย (Solubility) และการเกิดเจล (Gelation) เดียวกันได้ดี คาร์ราจีแนน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ Kappa , lota และ Lambda โดยแบ่งตามจำนวนและตำแหน่งของกลุ่ม Ester ซัลเฟต และ จำนวน 3,6-Anhydrogalactose (3,6-AG) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างของ พอลิแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำกันหลาย ๆ หน่วย จำนวนของ Sulphate องค์ประกอบเหล่านี้ในโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์ มีผลต่อความแข็งแรงของเจล (Gel strength), เนื้อสัมผัส (Texture) และความสามารถในการละลาย คาร์ราจีแนนทุกชนิดสามารถละลายได้ในน้ำร้อน แต่ถ้าเป็นเกลือโซเดียมของคาร์ราจีแนน ชนิด Kappa และ lota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น คาร์ราจีแนน ชนิด Lambda จะละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ขึ้นกับชนิดของไอออน และไม่เกิดผลกระทบจากเกลือที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์อาหาร มีความหนืดมากในน้ำเย็นและจะมีความหนืดมากขึ้นถ้าสารละลายถูกทำให้ร้อนและเย็น

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa ประกอบด้วยโมเลกุลของกาแล็กโทส (Galactose) ซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ชนิด β -1,3 และมีกลุ่มซัลเฟตเกาะที่ตำแหน่งที่ 4 คาร์ราจีแนนชนิดนี้ละลายในน้ำร้อน น้ำนมร้อนได้ดี เมื่อเย็นตัวจะเกิดเจล สามารถคืนตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermoreversible gel) มีลักษณะใส มีเนื้อสัมผัสที่แข็งและแน่น แต่เปราะ

คาร์ราจีแนนชนิด lota ประกอบด้วยกลุ่มซัลเฟตที่มีจำนวนมากกว่า Kappa ประมาณร้อยละ 25-50 ทำให้ความไวต่อปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ลดลง ส่งผลให้เจลมีความอ่อนนุ่ม และความยืดหยุ่นมากกว่าคาร์ราจีแนน ชนิด Kappa และสามารถทนต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ดีกว่า

คาร์ราจีแนน ชนิด Lambda ประกอบด้วย 1,3-Linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตในตำแหน่งที่ 2 ดังภาพที่ 9 ประมาณร้อยละ 70 และ 1,4-Linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตในตำแหน่งที่ 6 ซึ่ง คาร์ราจีแนนชนิดนี้ไม่ปิดวงเป็น 3,6 Anhydro galactose จึงทำให้ไม่มีสมบัติในการเกิดเจล (Gryncka, 2022)

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ lota มีความสามารถในการเกิดเจลได้ เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลง เจลเหล่านี้จะเกิดเป็นเจลที่สามารถคืนตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermoreversible gel) ถ้าผสมคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับ lota เข้าด้วยกันจะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้น เจลที่ได้จะยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น จึงใช้เป็นส่วนประกอบในเนื้อบรรจุกระป๋อง อาหารสัตว์ และอาหารปรุงสุก การใช้ Kappa คาร์ราจีแนน ร่วมกับ โลคัสปีนแกม จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสให้ดีขึ้น

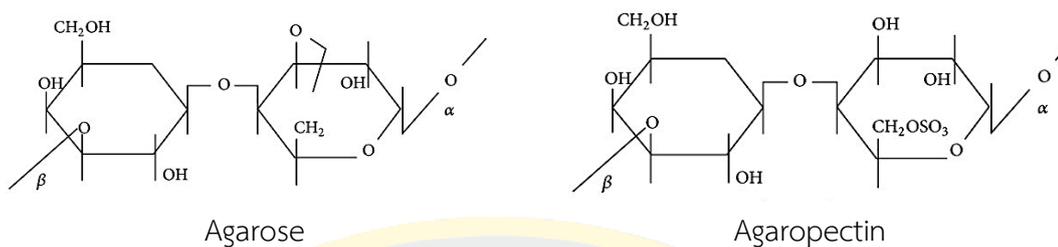


ภาพที่ 9 โครงสร้างโมเลกุลของคาราจีแนนทั้ง 3 ประเภท

ที่มา : “Alginates Combined with Natural Polymers as Valuable Drug Delivery Platforms..” โดย Kruk, K., & Winnicka, K., 2022, *Marine Drugs*, 21, หน้า 11.

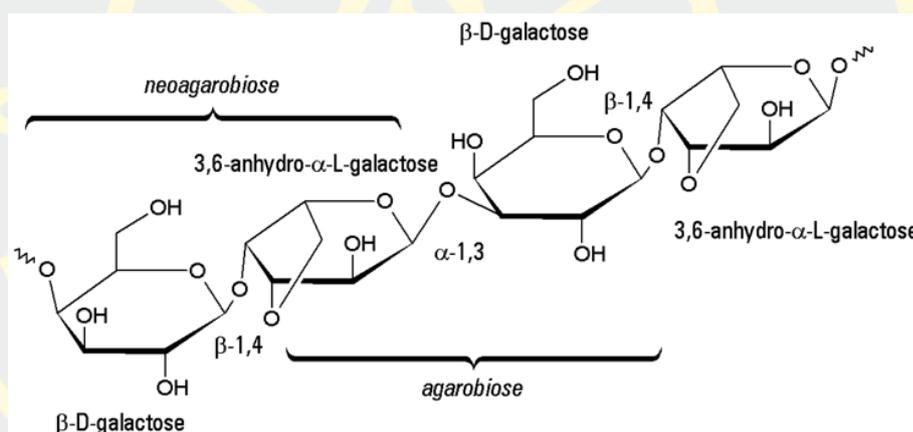
3.2 วุ้น (Agar)

สารไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดงที่อยู่ในฟิล์ม *Rhodophyta* สาหร่ายทะเลสีแดงที่นำมาใช้ในการสกัดวุ้นส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายในกลุ่ม *Gracilaria spp.* สาหร่ายทะเลสีแดงชนิดที่พบในเมืองไทย ได้แก่ สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*) โมเลกุลของวุ้นประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่สำคัญ 2 ชนิด คือ อากาโรส (Agarose) และ อากาโรเพคติน (Agaropectin) แสดงดังภาพที่ 10 อากาโรส เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกาแลคโตส (galactose) โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharides) คือ อากาโรไบโอส (Agarobiose) แสดงดังภาพที่ 11 ซึ่งประกอบด้วย β -D-galactose เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1 \rightarrow 3 และ 3,6-anhydro- α -L-galactose เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1 \rightarrow 4 โดยที่ในแต่ละโมเลกุลมีการต่อสลับกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic linkage) อากาโรสค่อนข้างเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุน้อยมากจึงถูกเรียกว่า non-ionic polysaccharide



(Varshosaz et al., 2015)

ภาพที่ 10 โครงสร้างของอากาโรส (Agarose) และอากาโรแพคติน (Agaropectin)
 ที่มา : “Preparation, Optimization, and Screening of the Effect of Processing Variables on Agar Nanospheres Loaded with Bupropion HCl by a D-Optimal Design.,” โดย Varshosaz, J., Zaki, M., Minaiyan, M., & Banoozadeh, J., 2015, *BioMed Research International*, 2015, หน้า 1-13.



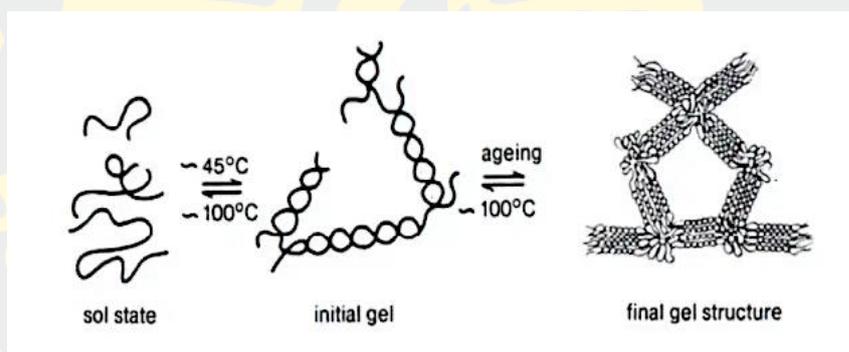
(Koczoń et al., 2022)

ภาพที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของอากาโรไบโอส (Agarobiose)
 ที่มา : “The Influence of the Structure of Selected Polymers on Their Properties and Food-Related Applications.,” โดย Koczoń, P., Josefsson, H., Michorowska, S., Tarnowska, K., Kowalska, D., Bartyzel, B. J., Gruczyńska-Sękowski, E., 2022, *Polymers*, 14(10), หน้า 1962.

สมบัติของวุ้น

สมบัติการละลาย ปกติวุ้นจะไม่ละลายน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส แต่จะละลายได้ดีในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสขึ้นไป หากใช้สารละลายวุ้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 จะต้องใช้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส ร่วมกับการคนสารละลายขณะให้ความร้อน จึงจะมี

การละลายอย่างสมบูรณ์ หากใช้ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 5 ต้องใช้หม้อนึ่งอัดความดันช่วยในการละลาย Kumar and Fotedar (2009) การเกิดเจลของวุ้น กลไกการเกิดเจลของวุ้นภาพที่ 12 จะเกิดขึ้นเมื่อละลายผงวุ้นที่อุณหภูมิสูงถึง 95-100 องศาเซลเซียส โมเลกุลของอะกาโรสในสารละลายจะมีลักษณะเป็น Random coil ซึ่งในระยะนี้โครงสร้างของโมเลกุลจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลง สายพอลิเมอร์แต่ละสายเกิดการพันกันเป็นเกลียวในลักษณะเกลียวคู่ (Double helice) เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงอีกปลายสายของ Double helice แต่ละคู่จะรวมตัวเข้ามาใกล้กันและเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยจุดเชื่อมต่อนี้เรียกว่า Junction zone ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจลมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติที่แข็งแรง หากนำเจลวุ้นไปให้ความร้อนอีกครั้งสารพอลิเมอร์ที่จับตัวกันเป็นเกลียวนั้น จะค่อยๆ คลายตัวออกจากกัน เมื่อทำการให้อุณหภูมิสูงกว่า 95 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเจลจะเกิดการคลายตัวกลายเป็นสารละลายในลักษณะของ Random coil อีกครั้ง ดังนั้นเจลวุ้นจึงมีสมบัติเป็น Thermoreversible gel เนื่องจากโครงสร้างของเจลมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Dai & Matsukawa, 2012)



(Lim et al., 2022)

ภาพที่ 12 การเกิดเจลของวุ้น

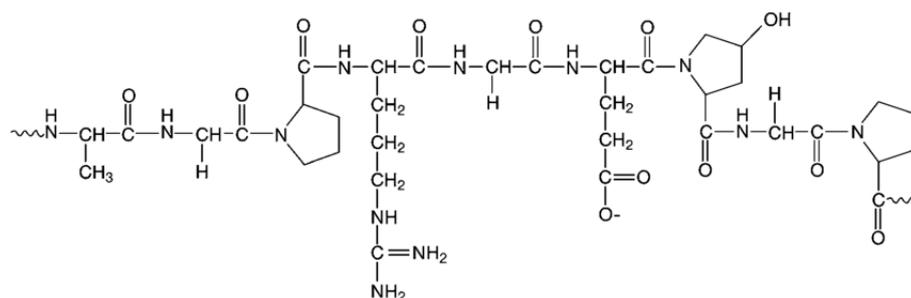
ที่มา : Lim, J., Pei, C., Hanry, E., Mansa, R., Moh, P., Hsiang, T., & Surugau, N., 2022, *Reinforced biopolymers from Seaweed using Plant-Based Celluloses -A Review.*

อุณหภูมิในการเกิดเจลของวุ้นจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการละลายมาก โดยจะเกิดการก่อเจลที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ใช้วุ้นความเข้มข้นเพียงร้อยละ 1-2 ก็ สามารถเกิดเจลได้ Prasad et al. (2008) ศึกษาอุณหภูมิในการเกิดเจลของวุ้นที่สกัดได้จากสาหร่ายสี แดงชนิด *G. acerosa* พบว่าวุ้นที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.5 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ที่ประมาณ 41.02 องศาเซลเซียส ขณะที่ Khadija et al. (2005) ศึกษาอุณหภูมิในการเกิดเจลของวุ้นความเข้มข้นของร้อยละ 1.5 พบว่ามีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ที่ 33 องศาเซลเซียส ความแตกต่างของ

อุณหภูมิในการเกิดเจลดังกล่าว อาจเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เจลวุ้นจะมีลักษณะเนื้อแข็ง ใส เปราะ แตกง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันของ Double helices ของสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา Khadija et al. (2005) อุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจลวุ้นนั้น จะสัมพันธ์กับความแข็งของเจล น้ำหนักโมเลกุลของวุ้น และระดับความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ หากวุ้นมีความแข็งของเจลสูงอุณหภูมิในการหลอมเหลวก็จะสูงขึ้นด้วย และนอกจากนี้อุณหภูมิในการหลอมเหลวจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณ 3,6-anhydro- α -L-galactose เพิ่มขึ้น ซึ่ง Prasad et al. (2008) ศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจลวุ้นที่สกัดได้จากสาหร่ายสีแดงชนิด *G.acerosa* ใช้ความเข้มข้นของผงวุ้นที่ ร้อยละ 1.5 พบว่าวุ้นมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ที่ 80.65 องศาเซลเซียส และ Khadija et al. (2005) ศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของวุ้น โดยใช้ความเข้มข้นของวุ้นที่ ร้อยละ 1.5 พบว่า วุ้นมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ที่ 81 องศาเซลเซียส

3.3 เจลาติน (Gelatin)

เจลาตินเป็นสารสกัดจากคอลลาเจนของเนื้อเยื่อในหนัง เอ็น และกระดูก โดยการใช้กรดหรือด่าง และสกัดด้วยน้ำร้อน สำหรับวัตถุประสงค์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเจลาตินในระดับอุตสาหกรรมนั้น มักใช้กระดูก และหนัง จากโค กระบือ และสุกร เนื่องจากจะให้เจลาตินที่มีคุณภาพดี ส่วนการผลิตเจลาตินจากปลานั้น ไม่ค่อยมีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมากนักเนื่องจากเจลาตินปลา มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวและให้ค่าความแข็งของเจลที่ค่อนข้างต่ำ เจลาตินเป็นสายพอลิเมอร์ ของโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดต่างๆ มาต่อกันเป็นสายยาว โดยพบไกลซีน ในปริมาณมากที่สุด ประมาณร้อยละ 33 ของกรดอะมิโนทั้งหมด พบโพรลีน ร้อยละ 12 และไฮดรอกซีโพรลีนร้อยละ 11 โครงสร้างของเจลาตินในตัวอย่างหลายชนิดจะเป็นไปทำนองเดียวกันคือจะมีองค์ประกอบของ กรดอะมิโนโพรลีน ไฮดรอกซี โพรลีน และไกลซีน โดยโมเลกุลประกอบด้วยลำดับของ glycine-X-Y triplets ที่ซ้ำ ๆ กัน ซึ่ง X และ Y มักเป็นกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีน แสดงดังภาพที่ 13 ระหว่างกรดอะมิโนแต่ละชนิดจะมีพันธะเพปไทด์เชื่อมอยู่เพื่อประกอบเป็นสายพอลิเพปไทด์ สายพอลิเพปไทด์จะมีการบิดเป็นเกลียวโดยมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโน เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นเกลียว (α -chain)



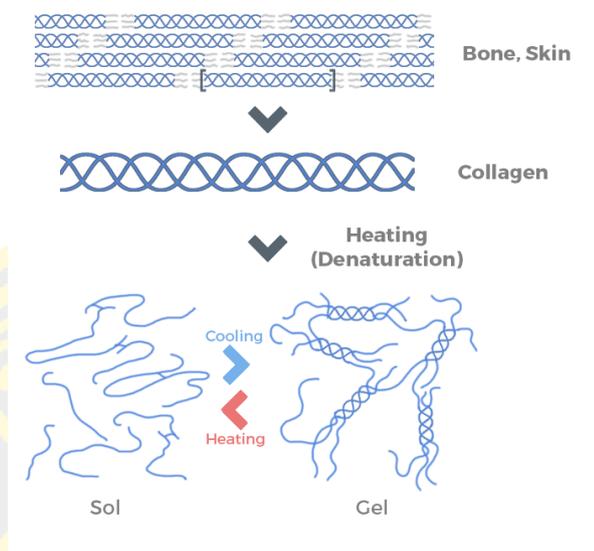
(Łabowska et al., 2021)

ภาพที่ 13 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน

ที่มา : “A Review on the Adaption of Alginate-Gelatin Hydrogels for 3D Cultures and Bioprinting,” โดย Łabowska, M., Cierluk, K., Jankowska, A., Kulbacka, J., Detyna, J., & Michalak, I., 2021, *Materials*, 14, หน้า 858.

สมบัติของเจลาติน

สีของเจลาตินควรจะมีสีจนถึงสีสว่างอำพันหรือสีเหลืองจางๆ ในสารละลายซึ่งเจลาตินเกรดต่ำ จะให้ลักษณะสีไม่โปร่งใสจนถึงขุ่น หรือมีสีเหลืองส้ม ความขุ่นของเจลาตินมักเกิดเนื่องจากใช้กระบวนการผลิตไม่ดี หรือมีวัตถุเจือปนอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย เจลาตินละลายได้เพียงบางส่วนในน้ำเย็น การละลายเจลาตินต้องทำที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งหากสูงกว่านี้ จะทำให้โครงสร้างของเจลาตินถูกทำลาย ส่งผลต่อคุณภาพของเจล ซึ่งอุณหภูมิอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการละลายของเจลาตินคือ 50-55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 (Schrieber & Gareis, 2007) สารละลายเจลาตินมีความหนืดซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นที่ใช้และเจลาตินมีความสามารถในการยึดติด จึงสามารถใช้เป็นกาวจากสัตว์ กลไกการเกิดเจลของเจลาตินนั้นเริ่มแรกเมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายเจลาตินจะเปลี่ยนเป็นสารละลายคอลลอยด์ (Colloidal solution) หรือซอล โมเลกุลของเจลาตินจะยึดตัวออกอยู่ในรูปของ Random coil แต่เมื่อทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง โมเลกุลที่ยึดตัวออกแล้วจะเริ่มเกิดการขดตัวอย่างซ้ำๆ (Fold) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงจุดก่อเจล จะมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมากขึ้น จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงขึ้น เชื่อมกันระหว่างโมเลกุลมากขึ้นด้วยพันธะไฮโดรเจนพันธะไอออนิก หรือพันธะไฮโดรโฟบิก จนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ดังแสดงภาพที่ 14 ซึ่งในระยษนี้ทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลเกิดการจับตัวกันอย่างคงตัวและแข็งแรงมากขึ้นพันธะหลักที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมกันของโมเลกุลเจลาตินคือพันธะไฮโดรเจน และหากมีการให้ความร้อนอีกครั้งจะเกิดการหลอมเหลวเป็นสารละลายหรือ โซล การเปลี่ยนเฟสระหว่างโซลและ เจลนี้เรียกว่า Sol-gel transition (Schrieber & Gareis, 2007)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนสภาพของเจลาติน

ที่มา : *Origin and molecular structure of gelatin.* <https://theory.labster.com/gelatin/>

(*Origin and molecular structure of gelatin.*)

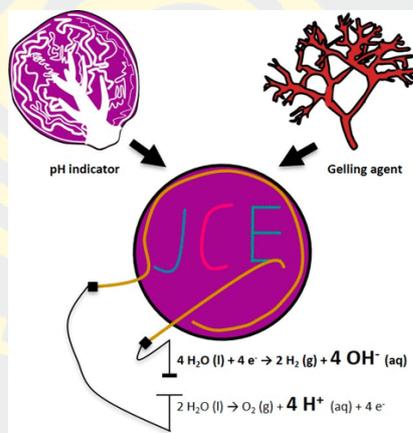
อุณหภูมิในการเกิดเจลของเจลาตินขึ้นอยู่กับระยะเวลาและความเข้มข้นที่ใช้ เมื่อปล่อยสารละลาย เจลาตินให้เย็นตัวลงสารละลายจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเกิดเจลในที่สุด แต่ทั้งนี้ การเกิดเจลของเจลาติน จะเร็วหรือจะช้าต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเจลาตินที่ใช้ เจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส และเจลาตินปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 8-25 องศาเซลเซียส

4. การศึกษาเกี่ยวกับเจลอิเล็กโทรไลต์

เจลอิเล็กโทรไลต์ เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความสำคัญในการศึกษาด้านเคมีไฟฟ้า โดยเฉพาะในงานวิจัยและการพัฒนานวัตกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่แบบชาร์จได้ เซลล์เชื้อเพลิง และอุปกรณ์เก็บพลังงานอื่นๆ (Sekhon & Missan, 2002) เจลอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวนำไอออนระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว ช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยเจลอิเล็กโทรไลต์มีคุณสมบัติพิเศษที่ช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์ไฟฟ้า (Armand et al., 2009) เมื่อเทียบกับอิเล็กโทรไลต์ในรูปของเหลวหรือแข็งแบบดั้งเดิม ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีส่วนประกอบต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการนำไอออน ความเสถียรเชิงเคมี และความสามารถในการทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์และสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ความหนาแน่น และความสามารถในการเก็บพลังงาน นอกจากนี้ เจลอิเล็กโทรไลต์ยังมีศักยภาพในการพัฒนาอุปกรณ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีความปลอดภัยสูง ลดความ

เสี่ยงจากการรั่วไหลของสารละลายและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ ในระดับการศึกษา การนำ เจลอิเล็กโทรไลต์มาใช้ในการทดลองทางเคมีไฟฟ้า เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยให้นักเรียนเข้าใจ หลักการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าได้อย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้น การศึกษาเกี่ยวกับเจลอิเล็กโทรไลต์ในห้องปฏิบัติการเปิดโอกาสให้นักเรียนได้สัมผัสกับการออกแบบและพัฒนาวัสดุที่ใช้ในเซลล์ไฟฟ้า รวมถึงการประยุกต์ใช้ความรู้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Fogde et al. (2020) ใช้ไฮโดรเจลเพื่อแสดงให้เห็นถึงการอิเล็กโทรไลซิสของน้ำซึ่งเป็น กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าพื้นฐานในการทดลองนี้ ไฮโดรเจลทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่มีปฏิกิริยาทาง เคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้นักเรียนสามารถมองเห็นกระบวนการในเปลี่ยนสีน้ำกะหล่ำปลีแดง ต่อการ เปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังภาพที่ 15 ช่วยทำความเข้าใจปฏิกิริยา รีดอกซ์และบทบาทของ pH ในเคมีไฟฟ้า โดยไฮโดรเจลเตรียมจากคาราจีแนนที่เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ ธรรมชาติเติมลงในน้ำเพื่อสร้างโครงสร้างไฮโดรเจล $MgSO_4$ เพื่อเพิ่มการเกิดเจลของคาราจีแนนกับน้ำ และอินดิเคเตอร์ตามธรรมชาติ สามารถเก็บไว้ได้นานกว่าหนึ่งสัปดาห์ทำให้สะดวกสำหรับการใช้งาน ซ้ำในการจัดการทดลอง



ภาพที่ 15 การทดลองอิเล็กโทรไลซิสของน้ำโดยใช้ไฮโดรเจล

ที่มา : “Colorimetric Hydrogel from Natural Indicators: A Tool for Electrochemistry Education..” โดย Fogde, A., Kurten, B., Sandberg, T., & Huynh, T. P., 2020, *Journal of Chemical Education*, 97(10), หน้า 3702-3706.

(Sosa et al., 2023b) ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เพื่อแสดงการทำงานของอิเล็กโทรดอ้างอิงและตัว บ่งชี้ในการวัดโพเทนเชียลโอเมตริกโดยใช้เจลจากผงเจลาตินที่ไม่ปรุงรสเติมลงในสารละลาย $ZnSO_4$ ร้อน (ประมาณ 50 °C) จนเกิดเจล สมบูรณ์ $ZnSO_4$ มีส่วนช่วยในการนำไฟฟ้าไอออนิกของเจลในฐานะที่

เป็นอิเล็กโทรไลต์ช่วยให้เจลสามารถนำไฟฟ้าได้ซึ่งจำเป็นสำหรับการทำงานในเซลล์กัลวานิก ภาพที่ 16 (ก) และการวัดโพเทนชิโอเมตริก ภาพที่ 10 (ข) เจลทำหน้าที่เป็นสื่อสำหรับการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรด การทดลองเจล $ZnSO_4$ สามารถใช้เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิงได้สิ่งนี้บ่งชี้ว่าเจลยังคงให้ศักย์ไฟฟ้าที่คงทน ซึ่งจำเป็นสำหรับการวัดโพเทนชิโอเมตริกซ์ที่ถูกต้อง ควรเก็บเจลไว้ในตู้เย็นเมื่อไม่ได้ใช้งานควรใช้ภายในหนึ่งสัปดาห์และหากไม่ขาดน้ำหรือแตกสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้



(ก) เซลล์กัลวานิกจากเจลโดยไม่ใช้สะพานเกลือ (ข) อุปกรณ์โพเทนชิโอเมตริกโดยใช้เจล $ZnSO_4$

ภาพที่ 16 การใช้เจล $ZnSO_4$ ในการทดลองเคมีไฟฟ้า

ที่มา : “Jelly Potentiometry, Do It Yourself,” โดย Sosa, L., Deluchi, E., Ramírez, A., & Hamer, M., 2023. *Journal of Chemical Education*, 100(6), หน้า 2373-2378.

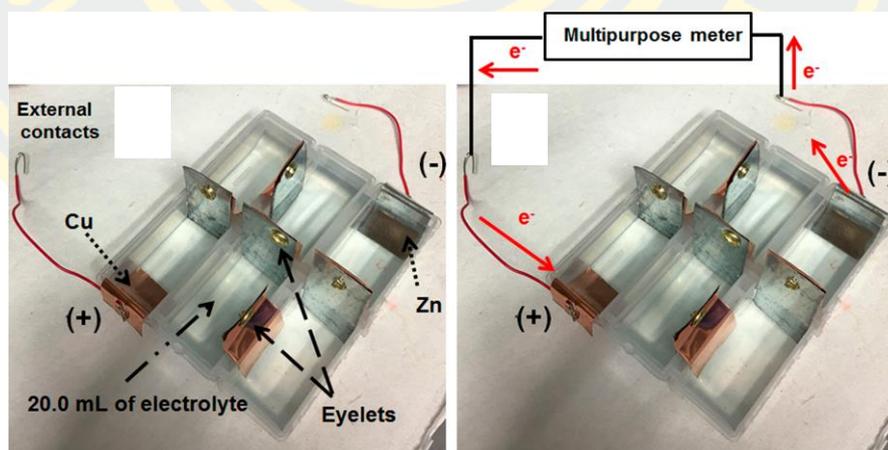
ไฮโดรเจลมีสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีที่เป็นประโยชน์ เช่น การดูดซับน้ำได้ดีและการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นเมื่อมีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในโครงสร้าง ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นตัวกลางในการทดลองที่ต้องการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของไอออนและการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ไฮโดรเจลสามารถนำมาใช้เป็นเจลอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อศึกษาและทดสอบปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น การสร้างเซลล์กัลวานิกแบบง่าย โดยที่ไฮโดรเจลทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือหรือเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนในการถ่ายโอนไอออนระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลนี้ช่วยให้สามารถตรวจสอบปฏิกิริยาและการเคลื่อนที่ของไอออนในเซลล์ได้อย่างชัดเจน

โดยสรุป การนำไฮโดรเจลและเจลอิเล็กโทรไลต์มาใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้ามีข้อดีหลายประการ เช่น การนำไปใช้ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีความปลอดภัยและมีความแม่นยำในการทดลองสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ไฮโดรเจลในการศึกษาเหล่านี้ยังต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความเหมาะสมของวัสดุและการเตรียมเจลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

5. การศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบตเตอรี่อย่างง่าย

การเรียนรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่และเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตร์ในระดับมัธยมศึกษา ที่มีความสำคัญในการสร้างพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้าและปฏิกิริยาเคมีในชีวิตประจำวัน การออกแบบกิจกรรมการสร้างแบตเตอรี่อย่างง่ายเป็นหนึ่งในแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการช่วยให้นักเรียนเข้าใจหลักการพื้นฐานของการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี การนำกิจกรรมนี้เข้าสู่ห้องเรียนไม่เพียงแต่เสริมสร้างความรู้ทางทฤษฎี แต่ยังส่งเสริมทักษะการคิดวิเคราะห์ และการแก้ปัญหาอย่างสร้างสรรค์ ในกิจกรรมการสร้างแบตเตอรี่อย่างง่าย นักเรียนจะได้ลงมือปฏิบัติ และทดลองสร้างแบตเตอรี่จากวัสดุที่หาได้ง่ายในชีวิตประจำวัน เช่น ขั้วโลหะ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ไลต์ที่เป็นของเหลว เช่น น้ำเกลือหรือน้ำผลไม้ การทดลองนี้ช่วยให้นักเรียนเข้าใจแนวคิดเรื่องปฏิกิริยารีดอกซ์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์กัลวานิก นอกจากนี้ ยังเปิดโอกาสให้นักเรียนได้ทดลองออกแบบและปรับปรุงแบตเตอรี่ด้วยตัวเอง ซึ่งเป็นการพัฒนาความคิดสร้างสรรค์ และการประยุกต์ใช้ความรู้ในทางปฏิบัติ ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Tan et al. (2019) การศึกษาการออกแบบแบตเตอรี่โดยใช้หลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โดยกำหนดให้นักเรียนเลือกใช้ไวน์ข้าวและ CuSO_4 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กำหนดอิเล็กโทรดคือ Zn, Cu, Sn และ Al ออกแบบแบตเตอรี่โดยต่อวงจรอนุกรมของเซลล์กัลวานิกเข้าด้วยกัน 6 คู่ ใช้ตาไก่ (Eyelet) หรือลวดเย็บกระดาษ (Staple) ยึดขั้วให้ติดกันไม่จำเป็นต้องใช้สายไฟในการต่อวงจร เพื่อให้ได้โอดจำนวน 4 ตัวแปลงแสง ดังภาพที่ 17



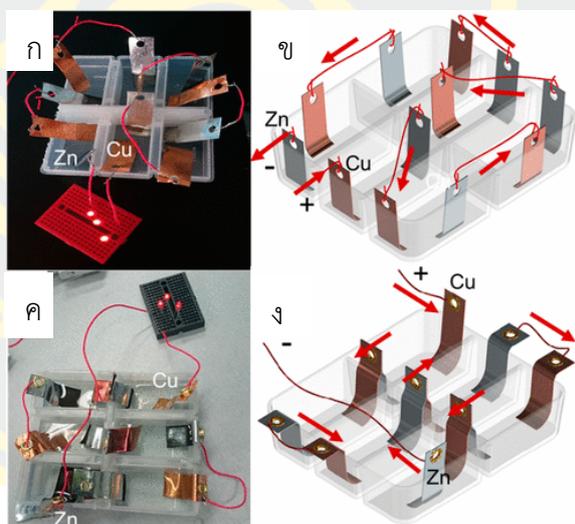
(ก) การจัดอุปกรณ์และต่อวงจรอนุกรม (ข) เส้นทางของอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปขั้วลบ

ภาพที่ 17 แบตเตอรี่จากการต่อวงจรอนุกรมของเซลล์กัลวานิก

ที่มา : “Development and Implementation of Design-Based Learning Opportunities for Students To Apply Electrochemical Principles in a Designette,” โดย Tan, S. Y., Hölttä-Otto, K., & Anariba, F., 2019. *Journal of Chemical Education*, 96(2), หน้า 256-266.

ผลการทดลองต้นแบบพบว่า คูโลหะที่ใช้ตาไก่ (Eyelet) เย็บ Zn-Cu ในสารละลาย CuSO_4 ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของกระแสมากที่สุด อีกทั้งสามารถทำให้ไดโอดจำนวน 4 ตัวเปล่งแสงได้ จากการจัดกิจกรรมการออกแบบแบตเตอรี่สามารถทำให้นักเรียนเข้าใจหลักการของแบตเตอรี่ได้ถูกต้องและสามารถนำประโยชน์จากแบตเตอรี่ไปใช้ประโยชน์ได้จริง

Chia et al. (2022) มอบหมายให้นักเรียนสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ให้แรงดันไฟฟ้า โดยใช้วัสดุและการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ สร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานได้ เช่น การเปิดไฟ LED ภูิบัตินี้ช่วยให้นักเรียนสามารถทดลองกับคู่อิเล็กโทรดที่แตกต่างกันและวิธีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า เช่น การใช้เย็บกระดาษ อายเล็ท หรือการเชื่อมต่อแบบขึ้นรูปด้วยตนเอง เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่ใช้งานได้ การวิเคราะห์ความเข้าใจผิดที่นักเรียนแสดงในระหว่างการสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้ารวมถึงปัญหา เช่น การลัดวงจร การกำหนดค่าไฟฟ้าที่ไม่ถูกต้อง และการวางตำแหน่งอิเล็กโทรดที่ไม่เหมาะสมด้วย การระบุความเข้าใจผิดเหล่านี้กระบวนการก่อสร้างเป็นวิธีการสำคัญในการประเมินความเข้าใจเชิงปฏิบัติของนักเรียนเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า



ภาพที่ 18 ตัวอย่างรูปแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำให้หลอดไฟ LED ติด

ที่มา : “Using the Electrochemistry Designette to Visualize Students’ Competence and Misconceptions on Electrochemical Principles,” โดย Chia, V. Y. Y., Hölttä-Otto, K., & Anariba, F., 2022, *Journal of Chemical Education*, 99(3), หน้า 1533-1538.

ตัวอย่างการออกแบบดังภาพที่ 18 (ก) การแก้ปัญหาโดยใช้ลวดตัวนำที่ผูกปมเป็นรูเจาะ เพื่อให้มีสภาพนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด Zn และ Cu (ข) แผนผังแผง ก ที่แสดงการจัดวางขั้วของอุปกรณ์ และการไหลของอิเล็กตรอน (ลูกศรสีแดง) (ค) การแก้ปัญหาโดยใช้สายเส้น และลวดตัวนำ เพื่อเชื่อมต่อไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด Zn และ Cu (ง) แผนผัง ค ที่แสดงการจัดวางขั้วของอุปกรณ์ และการไหลของอิเล็กตรอน (ลูกศรสีแดง) ตลอดทั้งอุปกรณ์ในการแก้ปัญหา กระแสไฟฟ้าจะถูกพาโดยไอออนบวกและไอออนลบ

งานวิจัยข้างต้นสามารถเสริมสร้างการเรียนรู้และการพัฒนาทักษะของนักเรียนได้ดี ผู้วิจัยสรุปข้อดีเป็นประเด็นได้ดังนี้

1. ช่วยให้นักเรียนได้เข้าใจหลักการทำงานของเซลล์เคมีไฟฟ้าและแบตเตอรี่ โดยผ่านการออกแบบและการทดลองด้วยตนเอง ซึ่งเป็นการเรียนรู้แบบลงมือปฏิบัติจริง (Hands-on learning) ที่ช่วยเพิ่มความเข้าใจในเนื้อหาที่ซับซ้อน.

2. นักเรียนได้ทดลองและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น การป้องกันการลัดวงจร การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และการจัดวางอิเล็กโทรด สิ่งเหล่านี้ช่วยพัฒนาทักษะการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรม.

3. นักเรียนสามารถสร้างอุปกรณ์ที่ใช้งานได้จริง เช่น การเปิดไฟ LED หรือการทำให้ไดโอดเปล่งแสง ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้มาในเชิงปฏิบัติและสร้างแรงบันดาลใจให้กับนักเรียนในการสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ

ข้อที่ต้องพัฒนาต่อ

1. การปรับปรุงวิธีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า: การใช้ตาไก่ (Eyelet) หรือลวดเย็บกระดาษในการเชื่อมต่ออิเล็กโทรดแม้จะง่าย แต่ก็อาจไม่เหมาะสมในบางกรณี เช่น เมื่อความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อนั้นมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ต้องการ จึงควรมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพและความเสถียรมากขึ้น

2. การจัดการและควบคุมการใช้งานสารละลายอิเล็กโทรไลต์: การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น CuSO_4 มีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น การจัดการความปลอดภัยและการควบคุมความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการทดลอง ควรมีการพัฒนาวิธีการจัดการและควบคุมสารละลายให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยยิ่งขึ้น

6. การศึกษาเกี่ยวกับการชุบด้วยไฟฟ้าและการทำโลหะให้บริสุทธิ์

Karpudewan and Daman Huri (2022) ออกแบบกิจกรรม Electrochemistry STEM-LAB สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย เพื่อให้เข้าใจหลักการของเคมีไฟฟ้าและสามารถนำไปใช้ในชีวิตจริง รวมถึงการทำงานในภาคอุตสาหกรรม โดยกิจกรรมเน้นให้นักเรียนได้ลงมือปฏิบัติ

และแก้ไขปัญหาคือผ่านกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม ตั้งแต่หลักการพื้นฐานสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การแยกสารที่หลอมเหลวและสารละลายด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การทำโลหะให้บริสุทธิ์ รวมถึงการใช้แหล่งพลังงานอื่นมาทดแทนในการทดลอง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) มาใช้ในการทดลองเรื่อง การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยหลักความเข้าใจในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด หลังจากผ่านกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ลงไป นักเรียนสามารถออกแบบชุดการทดลองที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

Ri et al. (2023) พัฒนาระบบการแยกไทเทเนียมบริสุทธิ์จากโลหะผสม CuTi โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่งในเกลือหลอมเหลวที่ปราศจากโพแทสเซียม วัตถุประสงค์คือพัฒนาวิธีการที่ไม่ใช้คาร์บอนโดยเน้นการประเมินประสิทธิภาพและความบริสุทธิ์ของไทเทเนียมที่ได้ มีการศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิ เวลา และปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการต่อประสิทธิภาพและความบริสุทธิ์ของไทเทเนียม ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่งที่พัฒนาขึ้นสามารถแยกไทเทเนียมบริสุทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไทเทเนียมที่ได้จากกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของกระบวนการในการแยกสิ่งเจือปนออกจากโลหะผสม CuTi อุณหภูมิและปริมาณไฟฟ้ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความบริสุทธิ์ของไทเทเนียมที่ได้ ตัวอย่างเช่น การปรับอุณหภูมิและปริมาณไฟฟ้าในกระบวนการอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของไทเทเนียม

Xiang et al. (2022) พัฒนาระบบการกระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่งเพื่อแยกโลหะตะกั่วหยาบ (crude lead) ให้เป็นโลหะตะกั่วบริสุทธิ์โดยใช้สารละลายเมทิลซัลโฟนิคแอซิด (MSA) ที่เพิ่มสารเสริม BNO12 โดยศึกษาตัวแปรได้แก่ความเข้มข้นของ BNO12, ศักย์ไฟฟ้า, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และคุณภาพของโลหะตะกั่วที่ได้ ผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ BNO12 ทำให้โลหะตะกั่วที่ได้มีลักษณะเรียบและหนาแน่นมากขึ้นแต่ต้องใช้พลังงานมากขึ้นศักย์ไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าก็เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของโลหะตะกั่วที่ได้

Ebru Saraloğlu, G. I. (2016) ศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบเคลือบผิวด้วยนิเกิลแบบนาโนคริสตัลไลน์จากอ่างชุบชนิด Watts โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิของอ่างชุบ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และการเติมสารซัคคารินที่มีต่อขนาดเกรนและค่าสัมประสิทธิ์ของเนื้อเยื่อ ($TC = I(200)/I(111)$) ของชั้นเคลือบด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ผลการวิจัย พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอ่างชุบจาก 45°C เป็น 55°C ขนาดเกรนลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะทำให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจาก 10 เป็น 75 mA/cm² ขนาดเกรนและค่า TC ลดลง แต่การเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อไปไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดเกรนที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กำหนด ขนาดเกรนและค่า TC ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณสารซัคคารินก่อนที่จะคงที่เมื่อถึง 3 กรัม/ลิตร

จากงานวิจัยข้างต้นผู้วิจัยนำมาประยุกต์ใช้ในออกแบบการทดลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการทำโลหะให้บริสุทธิ์ในระดับมัธยมศึกษา ดังนี้

1. ออกแบบกิจกรรมเพื่อให้เข้าใจหลักการพื้นฐานของเคมีไฟฟ้า รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด และวิธีการที่ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีส่วนในการทำให้เกิดการชุบโลหะหรือการทำโลหะบริสุทธิ์

2. การออกแบบกิจกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการทำโลหะให้บริสุทธิ์ ทดลองปรับตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และการเติมสารเติมแต่ง เพื่อตรวจสอบผลกระทบบที่มีต่อคุณภาพของชั้นเคลือบหลังชุบ และผลต่อความบริสุทธิ์ของโลหะที่ได้

3. สามารถประเมินผลนักเรียนโดยใช้เทคนิคเช่น การวัดความหนาของชั้นเคลือบ หรือการตรวจสอบความเรียบของพื้นผิว เพื่อเข้าใจผลกระทบของการปรับตัวแปรในกระบวนการชุบ

4. การทำโลหะให้บริสุทธิ์นักเรียนสามารถทดลองทำโลหะให้บริสุทธิ์โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิงในสารละลายหรือเกลือหลอมเหลวที่ง่ายและปลอดภัยกว่า เช่น การใช้สารละลายซึ่งไม่ต้องการอุณหภูมิสูงมากหรือไม่มีสารเคมีที่อันตราย

5. การนำพลังงานแหล่งอื่นมาใช้สำหรับการชุบโลหะหรือการทำโลหะบริสุทธิ์ โดยนักเรียนสามารถเรียนรู้วิธีการออกแบบระบบพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและนำไปใช้ในงานวิศวกรรม

6. นักเรียนควรได้เรียนรู้ว่าหลักการที่ได้เรียนรู้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานจริงในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การทำโลหะบริสุทธิ์สำหรับการผลิตวัสดุที่มีคุณภาพสูง

การประยุกต์ใช้เนื้อหาและกระบวนการจากงานวิจัยเหล่านี้จะช่วยให้นักเรียนไม่เพียงเข้าใจทฤษฎี แต่ยังมีโอกาสลงมือปฏิบัติและเห็นผลลัพธ์จริงจากการทดลองที่สามารถนำไปใช้ได้ในชีวิตประจำวันและภาคอุตสาหกรรม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาร่างชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่าย ที่ทำจากเจลอิเล็กโทรไลต์ มีสารเคมี และวัสดุอุปกรณ์ดังนี้

สารเคมี

1. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Molar mass 249.68 g/mol, AR Grade)
2. $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Molar mass 287.54 g/mol, AR Grade)
3. คาราจีแนน (บริษัท ทีซีเอส แปซิฟิก จำกัด)
4. ผงวุ้น (บริษัท แซงฮวด จำกัด)
5. เจลาตินจากหนังวัว (บริษัท คอนติเนนตัล ฟูด จำกัด)
6. แผ่นโลหะทองแดง ขนาด 1.5 cm x 5 cm
7. แผ่นโลหะสังกะสี ขนาด 1.5 cm x 5 cm
8. ตะปูเหล็กยาว 5 cm
9. แผ่นเมทัลชีท (AZ70 อลูซิงค์ 0.23 มม.)

วัสดุและอุปกรณ์

1. คีมย้ำโลหะ
2. กระดาษทรายเบอร์ 1
3. กรรไกรตัดโลหะ
4. ฟิมพ์ซิลิโคนขนาด 3 cm x 3 cm x 3 cm และขนาด 6 cm x 6 cm x 3 cm
5. กระดาษเยื่อ
6. สายไฟปากจระเข้สีดำ-แดง
7. ปีกเกอร์ขนาด 25, 50, 100 มิลลิลิตร
8. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100, 250 มิลลิลิตร
9. แท่งแก้วคน
10. เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง (บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด)
11. เตาให้ความร้อน (Hotplate) (บริษัท เฮ้าส์แวร์ โฮมเอนเตอร์ไพรส์ จำกัด, ประเทศไทย)
12. มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (kyoritsu model 1009) (บริษัท เคอิตซ์บลิว (ไทยแลนด์) จำกัด)
13. เทอร์โมมิเตอร์

ขั้นตอนการศึกษาประกอบด้วยทั้งหมด 6 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติเจลอิเล็กโทรไลต์

1.1 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1.1.1 สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟต (CuSO_4) 1.0 mol/L ซึ่ง $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 24.9680 g ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตร 100.00 ml ในขวดวัดปริมาตร

1.1.2 สารละลายซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) 1.0 mol/L ซึ่ง $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 28.7540 g ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตร 100.00 ml ในขวดวัดปริมาตร

1.2 การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์

1.2.1 วุ้น (Agar)

1) นำสารละลาย CuSO_4 1.0 mol/L ปริมาตร 100 ml ใส่ปิกเกอร์ขนาด 250 ml ตั้งบนเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 °C

2) ใส่ผงวุ้น 1.5 g ที่ละน้อยคนให้ละลายจนสารละลายใส

3) เทใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 3 cm x 3 cm x 3 cm รอให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้อง

4) ทำขั้นตอน 1) – 3) ซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนสารละลายเป็น ZnSO_4

1.2.2 วุ้น (Agar) ผสมคาราจีแนน (Carrageenan)

1) นำสารละลาย CuSO_4 1.0 mol/L ปริมาตร 100 ml ใส่ปิกเกอร์ขนาด 250 ml ตั้งบนเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 °C

2) ใส่ผงวุ้น 1.5 g ที่ละน้อยคนให้ละลายจนสารละลายใส ยกออกจากเตา

3) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 70 °C ผงคาราจีแนน 1.5 g ที่ละน้อยพร้อมคนให้ละลาย

4) เทใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 3 cm x 3 cm x 3 cm รอให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้อง

5) ทำขั้นตอน 1) – 3) ซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนสารละลายเป็น ZnSO_4

1.2.3 คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

1) นำสารละลาย CuSO_4 1.0 mol/L ปริมาตร 100 ml ใส่ปิกเกอร์ขนาด 250 ml ตั้งบนเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70 °C และยกออกจากเตา

2) ใส่ผงคาราจีแนน 1.5 g ที่ละน้อยพร้อมคนให้ละลาย

3) เทใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 3 cm x 3 cm x 3 cm รอให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้อง

4) ทำซ้ำขั้นตอน 1) - 3) ซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนสารละลายเป็น ZnSO_4

1.2.4 เจลาติน (Gelatin)

- 1) นำสารละลาย CuSO_4 1.0 mol/L ปริมาตร 100 ml ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 ml ตั้งบนเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50°C ยกออกจากเตา
- 2) ใส่ผงเจลาติน 3 g ที่ละน้อย พร้อมคนให้ละลาย
- 3) เทใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ รอให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้อง
- 4) ทำซ้ำขั้นตอน 1) - 3) ซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนสารละลายเป็น ZnSO_4

1.3 การหาปริมาณน้ำที่สูญเสียในเจลอิเล็กโทรไลต์

1.3.1 นำเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 4 ชนิดที่แข็งตัวแล้ว ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละเจลอิเล็กโทรไลต์ บันทึกค่า จากนั้นชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

1.3.2 คำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water loss) จากสมการ

$$\text{Water loss (\%)} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\%$$

W_0 คือ น้ำหนักของเจลอิเล็กโทรไลต์ตอนเริ่มต้น (g)

W_t คือ น้ำหนักของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เวลาใด ๆ (g)

1.3.3 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้งในแต่ละเจลอิเล็กโทรไลต์ แล้วหาค่าเฉลี่ย

ตอนที่ 2 การศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกประเภทเจลอิเล็กโทรไลต์

2.1 การเตรียมชิ้นโลหะ

2.1.1 ตัดแผ่นโลหะสังกะสี (Zn) และโลหะทองแดง (Cu) ขนาด $1.5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ชนิดละ 4 ชิ้น

2.1.2 ขัดแผ่นโลหะสังกะสี (Zn) และโลหะทองแดง (Cu) ด้วยกระดาษทรายใช้กระดาษเยื่อเช็ดเศษโลหะที่ติดอยู่กับแผ่นโลหะออก

2.2 เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด เหมือนตอนที่ 1 ข้อ 1.2 โดยเทใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ จำนวน 3 ช่อง

2.3 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เตรียมจากเจลอิเล็กโทรไลต์

2.3.1 นำเจลอิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 จากวุ้นผสมคาร์ราจีแนนที่แข็งตัวแล้ว ออกจากแม่พิมพ์และใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 ml โดยวางเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 2 ชนิดให้ติดกัน

2.3.2 ชัดขึ้นโลหะทองแดงและสังกะสีด้วยกระดาษทรายให้สะอาด ใช้กระดาษเยื่อเช็ดเศษโลหะที่ติดอยู่กับแผ่นโลหะออก

2.3.3 ปักโลหะทองแดง (Cu) ลงในเจลลี่เล็กโทรไลต์ CuSO_4 และปักโลหะสังกะสี (Zn) ลงในเจลลี่เล็กโทรไลต์ ZnSO_4 โดยระยะที่ปักลึก 3 cm

2.3.4 ใช้สายไฟปากจระเข้สีแดงต่อเข้ากับขั้วบวกของมัลติมิเตอร์ดิจิทัลและปลายอีกด้านต่อเข้ากับขั้วลบของมัลติมิเตอร์ดิจิทัลและปลายอีกด้านต่อเข้ากับขั้วโลหะสังกะสี บันทึกผลค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 360 นาที

2.3.5 ทดลองข้อ 2.3.1 – 2.3.4 แต่เปลี่ยนเจลลี่เล็กโทรไลต์เป็นเจลจากคาร์ราจีแนนและเจลาติน

2.3.6 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้งในแต่ละเจลลี่เล็กโทรไลต์

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่ใช้เตรียมเซลล์กัลวานิกประเภทเจลลี่เล็กโทรไลต์ ที่มีผลต่อความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้า

3.1 เตรียมเจลลี่เล็กโทรไลต์โดยใช้คาร์ราจีแนน

3.1.1 นำสารละลาย CuSO_4 1.0 mol/L ปริมาตร 100 ml ใส่ปิกรอร์ขนาด 250 ml ตั้งบนเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70°C

3.1.2 ใส่ผงคาร์ราจีแนน 1.5 g ที่ละลายน้ำพร้อมคนให้ละลาย

3.1.3 เทใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 3 cm x 3 cm x 3 cm จำนวน 3 ช่อง รอให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้อง

3.1.4 ทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3.1.1 – 3.1.3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายเป็น 0.50 mol/L, 0.25 mol/L, 0.10 mol/L ตามลำดับ

3.1.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3.1.1 – 3.1.4 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็น ZnSO_4

3.2 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกประเภทเจลลี่เล็กโทรไลต์

3.2.1 นำเจลลี่เล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่แข็งตัวแล้วแต่ละความเข้มข้นออกจากแม่พิมพ์และใส่ในปิกรอร์ขนาด 100 ml โดยวางเจลลี่เล็กโทรไลต์ทั้ง 2 ชนิดให้ติดกัน

3.2.2 ชัดขึ้นโลหะทองแดงและสังกะสีด้วยกระดาษทรายให้สะอาด ใช้กระดาษเยื่อเช็ดเศษโลหะที่ติดอยู่กับแผ่นโลหะออก

3.2.3 ปักโลหะทองแดง (Cu) ลงในเจลลี่เล็กโทรไลต์ CuSO_4 และปักโลหะสังกะสี (Zn) ลงในเจลลี่เล็กโทรไลต์ ZnSO_4 โดยระยะที่ปักลึก 3 cm

3.2.4 ใช้สายไฟปากจระเข้สีแดงต่อเข้ากับขั้วบวกของมัลติมิเตอร์และปลายอีกด้านต่อเข้ากับขั้วลบของมัลติมิเตอร์และสายไฟปากจระเข้สีดำต่อเข้ากับขั้วลบของมัลติมิเตอร์และปลายอีกด้านต่อเข้ากับขั้วลบของมัลติมิเตอร์ บันทึกราคาค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 360 นาที

3.2.5 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้งในแต่ละความเข้มข้นของเจลลี่อิเล็กโทรไลต์โดยใช้คาร์ราจีแนน

ตอนที่ 4 การสร้างแบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์และทดสอบสมบัติความคงทนต่อค่าศักย์ไฟฟ้า

4.1 การสร้างแบตเตอรี่จากเจลลี่อิเล็กโทรไลต์

4.1.1 นำสารละลาย CuSO_4 0.10 mol/L ปริมาตร 100 ml ใส่ปิกรอร์ขนาด 250 ml ตั้งบนเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70°C ยกออกจากเตา ใส่ผงคาร์ราจีแนน 1.5 g ที่ละน้อยพร้อมคนให้ละลาย

4.1.2 เทใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ จำนวน 6 ช่อง รอให้เกิดเจลลี่อุณหภูมิห้อง

4.1.3 ทำซ้ำขั้นตอน 4.1.1 - 4.1.2 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็น ZnSO_4 0.10 mol/L

4.1.4 นำเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ออกจากพิมพ์ ใส่บล็อกพลาสติกที่มีขนาดช่อง $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ จำนวน 6 ช่อง โดย 1 บล็อกมีเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 อย่างละ 1 ก้อน วางติดกันรวมทั้งหมด 6 บล็อก

4.1.5 ตัดแผ่นโลหะทองแดงและสังกะสีขนาด $1.5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ขัดขั้วโลหะทองแดงและสังกะสีด้วยกระดาษทรายให้สะอาด ใช้กระดาษเยื่อเช็ดเศษโลหะที่ติดอยู่กับแผ่นโลหะออก

4.1.6 ปักโลหะทองแดงลงในเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และปักโลหะสังกะสีลงในเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ ZnSO_4 แต่ละช่องจนครบ 6 คู่ โดยปักความลึกของขั้วโลหะเท่ากับ 3 cm

4.1.7 ต่อวงจรแบบอนุกรม โดยใช้ลวดเสียบกระดาษยึดขั้วโลหะเข้าด้วยกัน

4.2 การหาปริมาณน้ำที่สูญเสียในแบตเตอรี่เจลลี่อิเล็กโทรไลต์

4.2.1 นำแบตเตอรี่เจลลี่อิเล็กโทรไลต์ที่ต่อวงจรแล้ว ชั่งน้ำหนักทุก ๆ 30 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 360 นาที

4.2.2 คำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water loss) จากสมการ

$$\text{Water loss (\%)} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\%$$

W_0 คือ น้ำหนักของแบตเตอรี่เจลลี่เริ่มต้น (g)

W_t คือ น้ำหนักของแบตเตอรี่เจลลี่ที่เวลาใด ๆ (g)

4.2.3 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

4.3 การหาความคงทนของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่

4.3.1 สร้างแบตเตอรี่ตามขั้นตอนที่ 4.1

4.3.2 ใช้สายไฟปากจระเข้สีแดงต่อเข้ากับขั้วบวกของมัลติมิเตอร์ดิจิตอลและปลายอีกด้านต่อเข้ากับขั้วโลหะทองแดง และสายไฟปากจระเข้สีดำต่อเข้ากับขั้วลบของมัลติมิเตอร์ดิจิตอลและปลายอีกด้านต่อเข้ากับขั้วโลหะสังกะสี บันทึกผลค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 360 นาที

4.3.3 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้งหาค่าเฉลี่ย

ตอนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพการชุบโลหะโดยใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่เล็กโทรไลต์เทียบกับแบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย

5.1 สร้างแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์ตามขั้นตอนในตอนต้นที่ 4 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (V) และกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น (A) บันทึกค่าก่อนการทดลอง

5.2 เตรียมสารละลาย $ZnSO_4$ 0.10 mol/L ปริมาตร 250 ml แบ่งใส่ปิกรขนาด 25 ml ปริมาตร 20 ml

5.3 ตัดโลหะสังกะสีขนาด 1.5 cm x 5 cm และตะปูเหล็กความยาว 5 cm ขัดด้วยกระดาษทรายให้สะอาด ใช้กระดาษเยื่อเช็ดเศษโลหะที่ติดอยู่กับแผ่นโลหะออก

5.4 ชั่งน้ำหนักของโลหะสังกะสีและตะปูเหล็กโดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าเป็นน้ำหนักเริ่มต้นก่อนการทดลอง

5.5 จุ่มโลหะสังกะสีและตะปูเหล็กลงในปิกรที่บรรจุสารละลาย $ZnSO_4$ โดยไม่ให้ชิ้นโลหะสัมผัสกัน กำหนดให้โลหะสังกะสีและตะปูเหล็กมีความลึก 3 cm

5.6 ใช้สายไฟปากจระเข้สีแดงต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์และปลายอีกด้านต่อเข้ากับขั้วโลหะสังกะสี และสายไฟปากจระเข้สีดำต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์และปลายอีกด้านต่อเข้ากับตะปูเหล็ก จับเวลา 5 นาที

5.7 นำชิ้นโลหะทั้ง 2 ล้างด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้ง ชั่งน้ำหนักของโลหะ บันทึกค่าศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (A) ของแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์หลังการทดลอง

5.8 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

5.9 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 5.1 - 5.8 โดยเปลี่ยนแบตเตอรี่จากเจลลี่เล็กโทรไลต์เป็นถ่านไฟฉาย

5.10 คำนวณหาผลได้ตามทฤษฎีของการชุบโดยใช้กฎฟาราเดย์ ดังนี้

$$Q = It$$

โดย $Q =$ ประจุไฟฟ้า (C)

$I =$ กระแสไฟฟ้า (A)

หมายเหตุ หากค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดลอง ให้คิดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย จาก (กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น + กระแสไฟฟ้าสุดท้าย) / 2

t = เวลาที่ให้กระแสไฟฟ้า (s)

เมื่อคำนวณหา Q แล้ว สามารถนำไปคำนวณหาน้ำหนักโลหะที่เกาะที่ขั้วไฟฟ้าได้ ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ (1F) หรือ 96,485 C จะทำให้เกิดสารที่ขั้วไฟฟ้าหนัก เท่ากับ 1 กรัมสมมูล

$$1 \text{ กรัมสมมูล} = \frac{\text{มวลของสาร 1 โมล (กรัม)}}{\text{จำนวนอิเล็กตรอนที่ให้หรือรับ}}$$

5.11 คำนวณหาผลได้ร้อยละ

$$\text{ผลได้ร้อยละ} = \frac{\text{ผลที่ได้จริง (กรัม)}}{\text{ผลที่ได้ตามทฤษฎี}} \times 100$$

ตอนที่ 6 การศึกษาประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่จาก เจลอิเล็กโทรไลต์เทียบกับแบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย

6.1 สร้างแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ตามขั้นตอนในตอนต้นที่ 4 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (V) และ กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น (A) บันทึกค่าก่อนการทดลอง

6.2 เตรียมสารละลาย ZnSO_4 0.10 mol/L ปริมาตร 250 ml แบ่งใส่บีกเกอร์ขนาด 25 ml ปริมาตร 20 ml

6.3 ตัดโลหะสังกะสีและแผ่นเมทัลลิกซ์ (AZ70 อลูมิเนียม 0.23 มม.) ขนาด 1.5 cm x 5 cm ขัดด้วยกระดาษทรายให้สะอาด ใช้กระดาษเยื่อเช็ดเศษโลหะที่ติดอยู่กับแผ่นโลหะออก

6.4 ชั่งน้ำหนักของโลหะสังกะสีและแผ่นเมทัลลิกซ์โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าเป็น น้ำหนักเริ่มต้นก่อนการทดลอง

6.5 จุ่มโลหะสังกะสีและแผ่นเมทัลลิกซ์ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลาย ZnSO_4 โดยไม่ให้ชิ้น โลหะสัมผัสกัน โดยให้โลหะสังกะสีและแผ่นเมทัลลิกซ์มีความลึก 3 cm เท่ากัน

6.6 ใช้สายไฟปากจระเข้สีแดงต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์ และปลาย อีกด้านต่อเข้ากับแผ่นเมทัลลิกซ์ สายไฟปากจระเข้สีดำต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์และปลายอีกด้านต่อเข้ากับชิ้นโลหะสังกะสี จับเวลา 10 นาที

6.7 นำชิ้นโลหะทั้ง 2 ล้างด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้ง ชั่งน้ำหนักของโลหะ บันทึกค่า ศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (A) ของแบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์หลังการทดลอง

6.8 ทดลองซ้ำ อีก 2 ครั้ง

- 6.9 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 6.1 - 6.8 โดยเปลี่ยนแบตเตอรี่จากเจลลี่ลิเธียมเป็นถ่านไฟฉาย
- 6.10 คำนวณหาผลได้ร้อยละ

$$\text{ผลได้ร้อยละ} = \frac{\text{ผลที่ได้จริง (กรัม)}}{\text{ผลที่ได้ตามทฤษฎี}} \times 100$$



บทที่ 4

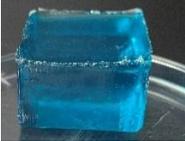
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การวิจัยเรื่องชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่ายที่ทำจากเจลอิเล็กโทรไลต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกที่เตรียมจากเจลอิเล็กโทรไลต์ (2) ประยุกต์ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์สร้างแบตเตอรี่อย่างง่ายและศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้น (3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์ (4) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ที่ใช้แบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งได้แบ่งการดำเนินการวิจัยเป็น 6 ตอน ผู้วิจัยขอเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั้ง 6 ขั้นตอน ดังนี้

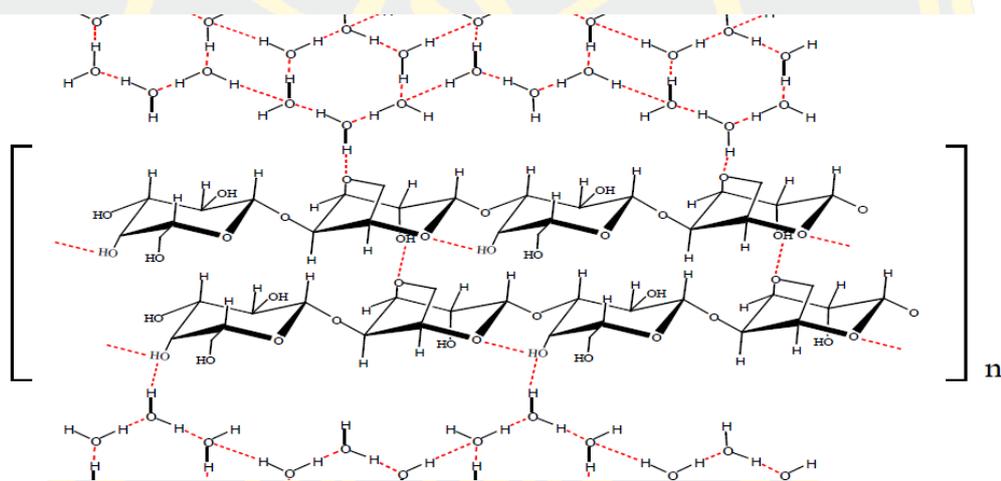
ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติเจลอิเล็กโทรไลต์

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและการสูญเสียน้ำของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 เข้มข้น 1.0 mol/L กับสารไฮโดรคอลลอยด์ 4 ชนิด คือ วุ้น คาร์ราจีแนน วุ้นผสมคาร์ราจีแนนและเจลาติน เมื่อเจลแข็งตัวนำไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการทดลองดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิด

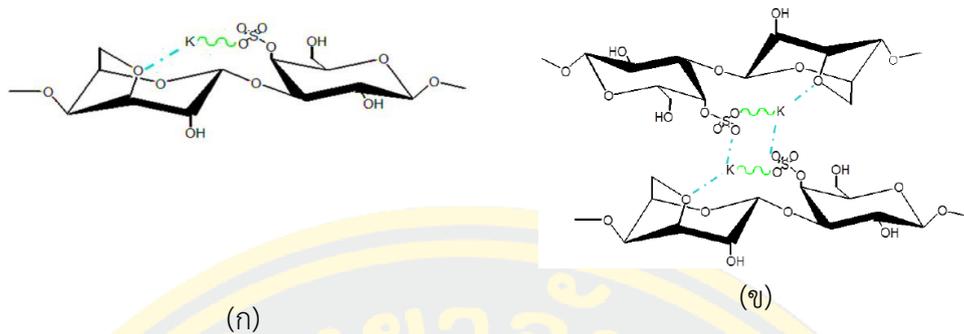
ไฮโดรคอลลอยด์	อิเล็กโทรไลต์		ลักษณะทางกายภาพ
	Cu^{2+} 1.0 M	Zn^{2+} 1.0 M	
วุ้น (Agar)	-	-	เจลไม่แข็งตัว
คาร์ราจีแนน (Carrageenan)			เนื้อเจลขุ่น มีความแข็ง แต่ยืดหยุ่น แข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง
วุ้นผสมคาร์ราจีแนน (Agar+Carrageenan)			เนื้อเจลขุ่น มีความแข็ง แต่เปราะ แข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง
เจลาติน (Gelatin)			เนื้อเจลใส มีความเหนียว ยืดหยุ่น มาก แข็งตัวได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C

จากผลในตารางที่ 1 พบว่าการเติมวุ้น (Agar) ลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น 1.0 mol/L ไม่สามารถทำให้เกิดเจลได้ เนื่องจากการเกิดเจลของวุ้นนั้นเมื่อละลายวุ้นที่อุณหภูมิ 95 -100 °C โมเลกุลของอะกาโรสจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิลดลงสายพอลิเมอร์แต่ละสายเกิดการพันกันเป็นเกลียวในลักษณะเกลียวคู่ (double helice) แต่ละคู่จะรวมตัวเข้ามาใกล้กันและเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังภาพที่ 19 ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจลมากขึ้น (Masakuni et al., 2014) และจากการเติมวุ้นลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นสูง ระยะห่างและจำนวนโมเลกุลน้ำตาลลงมีผลต่อคุณสมบัติของวุ้น การนำวุ้นผสมกับคาร์ราจีแนนเพื่อการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเจลอิเล็กโทรไลต์ พบว่า เจลแข็งตัวได้ดี เมื่อตั้งทิ้งไว้พบว่าเกิดการแยกตัวของน้ำระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันของ double helices ของสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ (Khadija et al., 2005)



ภาพที่ 19 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส (Agar) และการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ
ที่มา : “The Principles of Starch Gelatinization and Retrogradation.,” โดย Masakuni, T., Tamaki, Y., Teruya, T., & Takeda, Y., 2014, *Food and Nutrition Sciences*, 05, หน้า 283.

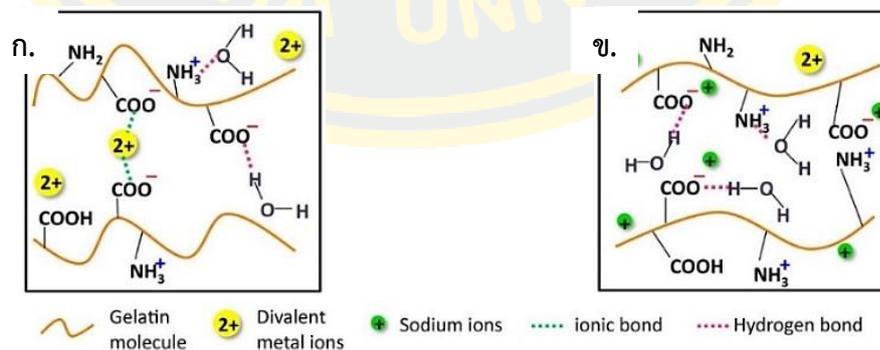
ส่วนเจลอิเล็กโทรไลต์คาร์ราจีแนนสามารถเกิดเจลได้ดี เนื่องจากเป็นพอลิแซคคาไรด์มีโมเลกุลกลุ่มซัลเฟต กลุ่มน้ำตาลหลายชนิดที่สามารถสร้างเจลที่มีความแข็งแรง และช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี (Robal et al., 2017) เมื่อมีไอออนบวกขนาดใหญ่ (เช่น K^+ , Rb^+ , Cs^+) จะมีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าช่วยให้เกิดเจลได้เร็วและแข็งแรงมากขึ้น ดังภาพที่ 20 ในขณะเดียวกัน ไอออนบวกขนาดเล็ก (เช่น Li^+ , Na^+) จะไม่ทำให้เกิดเจล (Masakuni et al., 2014)



ภาพที่ 20 (ก) พันธะไอออนิก (~~~~) และแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (---) ของแคตไอออนภายในโมเลกุล *K*-คาราจีแนน ในสารละลายที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิต่ำ (ข) กลไกการเกิดเจลของ *K*-คาราจีแนน กับโพแทสเซียมไอออน (K^+)

ที่มา : “The Principles of Starch Gelatinization and Retrogradation.,” โดย Masakuni, T., Tamaki, Y., Teruya, T., & Takeda, Y., 2014, *Food and Nutrition Sciences*, 05, หน้า 281.

ในส่วนเจลลี่เล็กโพรไลต์จากเจลาตินมีความแข็งแรง ยืดหยุ่นและเกิดเจลได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีพันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะหลักในการเกิดเจล (Schrieber and Gareis, 2007) เมื่อมีแคตไอออน ไอออนเหล่านี้สร้างพันธะไอออนิกกับกรดคาร์บอกซิลิก กลุ่มบนสายโซ่โพลีเมอร์ของเจลาตินช่วยให้เกิดเจลได้ดีขึ้น โครงสร้างเจลาตินโพลีเมอร์มีคุณสมบัติที่ชอบน้ำสูง ซึ่งดูดซับน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของน้ำ กรดคาร์บอกซิลิกและหมู่เอมีโน โครงสร้างของเจลลี่เล็กโพรไลต์จากเจลาตินที่มี Divalent ions (Cu^{2+} และ Zn^{2+}) จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ monovalent ions ที่สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวได้หนาแน่นกว่า (Xing et al., 2014) ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 (ก) ปฏิกริยาระหว่างไอออนและโมเลกุลเจลาตินที่มีไอออน +2 และ (ข) ไอออน +1
ที่มา : “Increasing Mechanical Strength of Gelatin Hydrogels by Divalent Metal Ion Removal.,” โดย Xing, Q., Yates, K., Vogt, C., Qian, Z., Frost, M. C., & Zhao, F., 2014, *Scientific Reports*, 4(1), หน้า 4706.

จากคุณสมบัติของเจลลี่เล็กโพรไลด์สามารถหาประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำได้
จากค่าร้อยละของการสูญเสียน้ำเฉลี่ย คำนวณได้จากสมการ

$$\text{Water loss (\%)} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

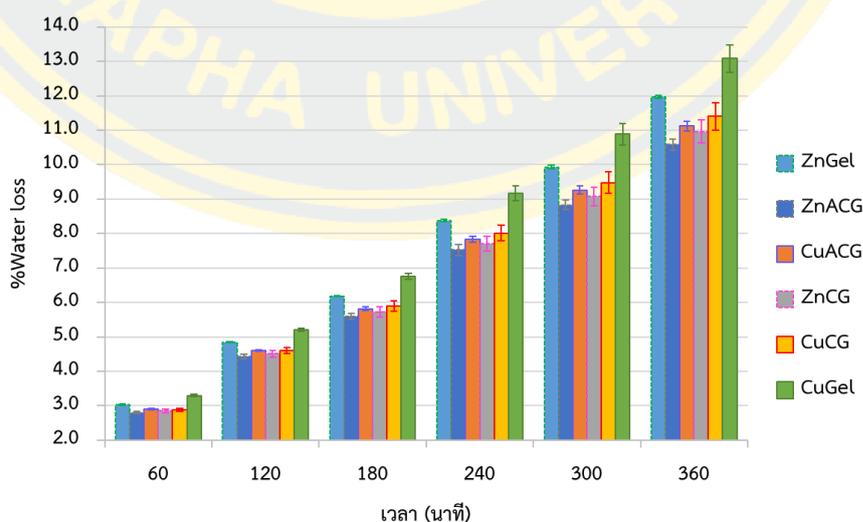
W_0 คือ น้ำหนักของเจลลี่เล็กโพรไลด์ตอนเริ่มต้น (g)

W_t คือ น้ำหนักของเจลลี่เล็กโพรไลด์ที่เวลาใด ๆ (g)

ได้ผลดังตารางที่ 2 และภาพที่ 22

ตารางที่ 2 ร้อยละการสูญเสียน้ำเฉลี่ยของเจลลี่เล็กโพรไลด์ชนิดต่างๆ ที่ 25 °C

เวลา (นาที)	ร้อยละการสูญเสียน้ำเฉลี่ย (% water loss) ของเจลลี่เล็กโพรไลด์					
	Agar+Carrageenan		Carrageenan		Gelatin	
	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺
60	2.793	2.895	2.849	2.878	3.030	3.292
120	4.427	4.604	4.508	4.605	4.843	5.210
180	5.598	5.816	5.715	5.894	6.179	6.756
240	7.523	7.836	7.703	8.012	8.377	9.180
300	8.834	9.259	9.078	9.477	9.928	10.885
360	10.590	11.123	10.964	11.405	11.973	13.089



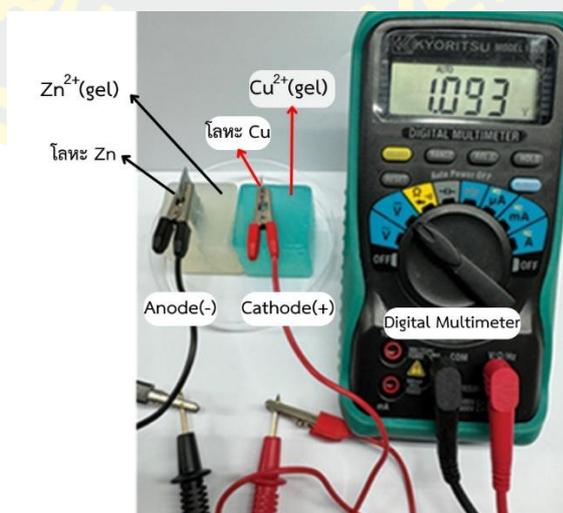
หมายเหตุ * ACG = Agar+Carrageenan, CG = Carrageenan, Gel = Gelatin

ภาพที่ 22 เปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียน้ำเฉลี่ย (%water loss) ของเจลลี่เล็กโพรไลด์แต่ละชนิด
เข้มข้น 1.00 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง

จากภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่าอัตราการสูญเสียน้ำเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 120 นาทีแรก เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง เจลอิเล็กโทรไลต์ Cu^{2+} จากเจลาตินมีการสูญเสียน้ำเฉลี่ยมากที่สุดร้อยละ 13.089 รองลงมาคือ เจลอิเล็กโทรไลต์ Zn^{2+} จากเจลาตินร้อยละ 11.973 เจลอิเล็กโทรไลต์ Cu^{2+} จากคาร์ราจีแนนร้อยละ 11.405 เจลอิเล็กโทรไลต์ Cu^{2+} จากวุ้นผสมคาร์ราจีแนนร้อยละ 11.123 เจลอิเล็กโทรไลต์ Zn^{2+} จากคาร์ราจีแนนร้อยละ 10.964 และเจลอิเล็กโทรไลต์ Zn^{2+} จากวุ้นผสมคาร์ราจีแนนร้อยละ 10.590 สรุปได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์เจลาตินมีการสูญเสียน้ำมากที่สุดตามด้วยคาร์ราจีแนน และวุ้นผสมคาร์ราจีแนน โดยประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำในเจลขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในโมเลกุลดังนี้ เจลาตินเป็นโปรตีนที่ได้จากการแปรรูปคอลลาเจนโครงสร้างแบบ triple helix ของคอลลาเจนช่วยให้เจลาตินมีความยืดหยุ่นสามารถกักเก็บโมเลกุลน้ำได้ (Schrieber & Gareis, 2007) แต่น้อยกว่าคาร์ราจีแนนที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์มีโมเลกุลกลุ่มซัลเฟตกลุ่มน้ำตาลหลายชนิดสามารถสร้างเจลที่มีความแข็งแรง และช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี (Robal et al., 2017) ส่วนเจลวุ้นจะเกิดการแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากระยะเวลานานขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันของ Double helices ของสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Khadija et al., 2005) จึงต้องผสมกับคาร์ราจีแนนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกักเก็บน้ำให้ดีขึ้น

ตอนที่ 2 การศึกษาความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกประเภทเจลอิเล็กโทรไลต์

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อต่อเป็นเซลล์กัลวานิก 1 เซลล์ โดยใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด การจัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 23



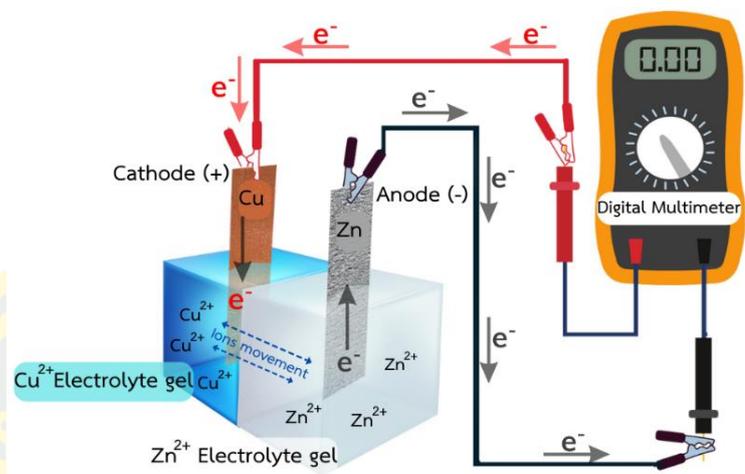
ภาพที่ 23 การจัดอุปกรณ์วัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกของเจลอิเล็กโทรไลต์ Cu^{2+} และ Zn^{2+} โดยการวางเจลติดกันและไม่ต้องใช้สะพานเกลือ

จากการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้าเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด เข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ 25 °C ทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพเซลล์กัลวานิกเจลลี่อิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิด

เจลลี่อิเล็กโทรไลต์หลัง 6 ชั่วโมง		ลักษณะทางกายภาพ	
Zn ²⁺	Cu ²⁺	เจลลี่อิเล็กโทรไลต์	ขั้วโลหะ
		เนื้อเจลชุ่มเปราะง่าย มีรอยแตกบริเวณที่ปักโลหะและมีของเหลวซึมออกมา เจล Zn ²⁺ มีสีฟ้าของ Cu ²⁺ ในเนื้อเจล	Zn มีสีดำและผิวบางลง Cu มีของแข็งสีน้ำตาลแดงเกาะบริเวณขั้วและสะสมในเนื้อเจลใกล้กับขั้ว
		เนื้อเจลชุ่มแข็ง ยืดหยุ่น บริเวณที่ปักโลหะมีของเหลวซึมออกมาเล็กน้อย มีของเหลวซึมออกมา เจล Zn ²⁺ มีสีฟ้าของ Cu ²⁺ ในเนื้อเจลบริเวณด้านล่าง	Zn มีสีดำเล็กน้อยและผิวบางลง Cu มีของแข็งสีน้ำตาลแดงเกาะบริเวณขั้วและสะสมในเนื้อเจลใกล้กับขั้ว
		เนื้อเจลใสียืดหยุ่นมาก ค่อนข้างอ่อนตัว รักษารูปทรงได้ยากขึ้น และจะหลอมเหลวเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 25 °C มีสีฟ้าของ Cu ²⁺ ในเนื้อเจลบริเวณด้านล่าง	Zn มีสีดำและผิวบางลง Cu มีของแข็งสีน้ำตาลแดงเกาะบริเวณขั้วและสะสมในเนื้อเจลใกล้กับขั้วน้อยกว่าเจลชนิดอื่น

จากตารางที่ 3 เมื่อนำขั้วโลหะสังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) ปักลงในเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ Zn²⁺ และ Cu²⁺ ทั้ง 3 ชนิด จากนั้นนำก้อนเจลมาซิดกันโดยไม่ต้องใช้สะพานเกลือ และต่อวงจรวัดตลอดเวลาวัดค่าทุกๆ 10 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง พบว่า บริเวณที่ปักขั้วโลหะมีของเหลวซึมออกมา โดยเจลที่ได้จากวุ้นผสมคาราจีแนนมีของเหลวซึมออกมามากที่สุด รองลงมาคือ คาร์ราจีแนน และเจลาติน ทำให้รูปทรงของเจลเริ่มอ่อนตัว ขั้วสังกะสีส่วนที่ปักลงในเนื้อเจล Zn²⁺ มีผิวที่บางลง และมีสีดำ เนื่องจากเสียอิเล็กตรอน ด้านขั้วโลหะทองแดงมีของแข็งสีน้ำตาลแดงเกาะบริเวณขั้ว เนื่องจาก Cu²⁺ รับอิเล็กตรอนได้ทองแดง (Cu) จากปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในเซลล์กัลวานิกดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนในเซลล์กัลวานิกแบบเจลอิเล็กโทรไลต์
ที่มา : วาดโดยผู้วิจัยจากโปรแกรม canva

ปฏิกิริยาภายในเซลล์และศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็น ดังนี้



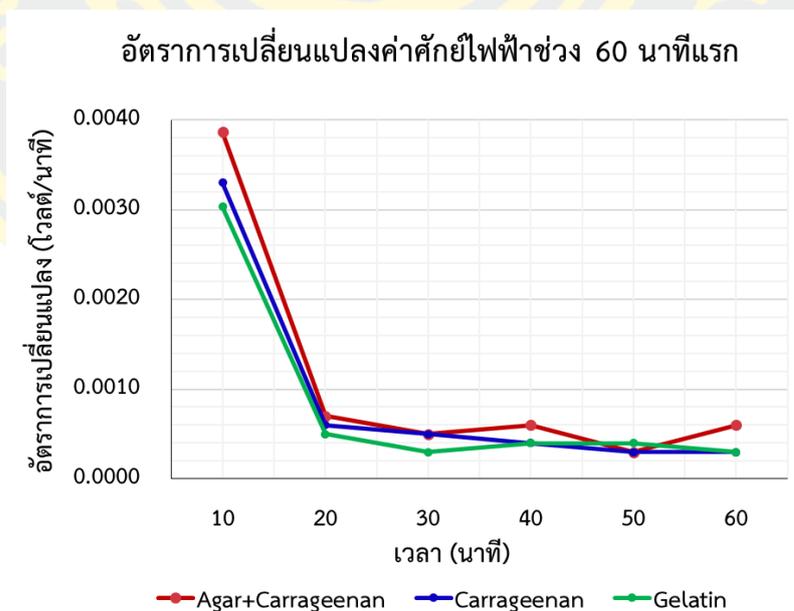
เมื่อวัดความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (E_{cell}^0) ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิดที่ 25 °C

เวลา (นาที)	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของเซลล์ Zn Cu ความเข้มข้น 1.00 mol/L		
	Agar+Carrageenan	Carrageenan	Gelatin
0	1.076	1.093	1.095
10	1.037	1.060	1.065
20	1.030	1.054	1.060
30	1.025	1.049	1.057
40	1.019	1.045	1.053
50	1.016	1.042	1.049
60	1.010	1.039	1.046

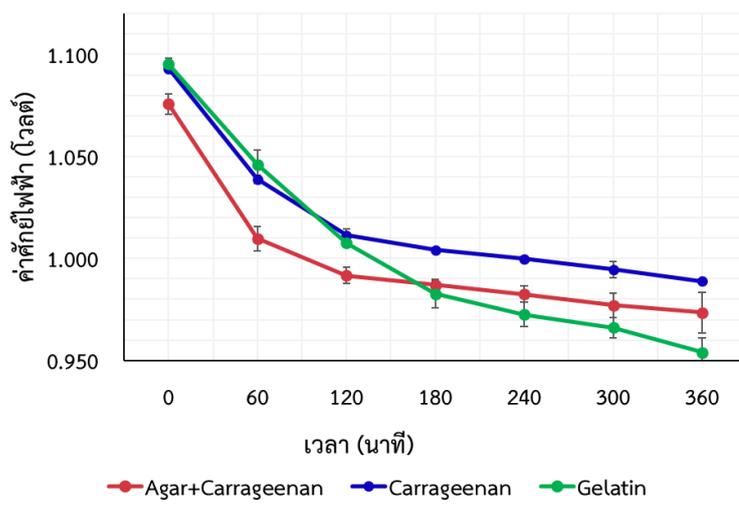
เวลา (นาที)	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของเซลล์ Zn Cu ความเข้มข้น 1.00 mol/L		
	Agar+Carrageenan	Carrageenan	Gelatin
120	0.992	1.011	1.008
180	0.987	1.004	0.983
240	0.983	1.000	0.973
300	0.977	0.995	0.966
360	0.974	0.989	0.954

จากตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ Zn^{2+} และ Cu^{2+} เข้มข้น 1.00 โมลต่อลิตร กับวุ้นผสมคาร์ราจีแนน คาร์ราจีแนนและเจลาติน พบว่า เมื่อเริ่มต้นค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงใกล้เคียงกับ 1.10 V ที่สภาวะมาตรฐาน โดยค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 1.076 โวลต์, 1.093 โวลต์ และ 1.095 โวลต์ ตามลำดับ และมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) เท่ากับ 2.21, 0.64 และ 0.42 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อต่อเซลล์ไว้ตลอดเวลาและวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที พบว่า เซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์จากคาร์ราจีแนน มีอัตราการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยที่สุดอยู่ที่ 2.89×10^{-4} โวลต์ต่อนาที รองลงมาเป็นวุ้นผสมคาร์ราจีแนนและเจลาติน อยู่ที่ 2.92×10^{-4} และ 3.92×10^{-4} โวลต์ต่อนาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด

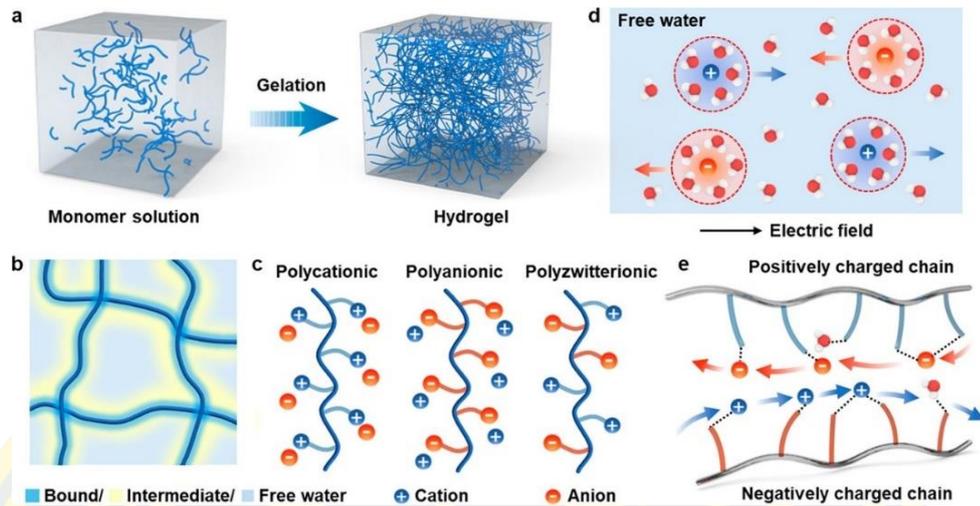
การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ใน 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 26 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลลี่เล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด

เมื่อเวลาผ่านไปครบ 6 ชั่วโมงพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกวุ้นผสมคาร์ราจีแนน คาร์ราจีแนนและเจลาตินลดลงเหลือ 0.974, 0.989 และ 0.954 โวลต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 26 จะเห็นได้ว่าเซลล์กัลวานิกเจลลี่เล็กโทรไลต์จากเจลาตินให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นสูงสุดที่มีค่าใกล้เคียงกับ ทฤษฎี ($E_{\text{cell}}^0 = 1.10 \text{ V}$) ที่สภาวะมาตรฐาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Sosa et al., 2023) เนื่องจากคุณสมบัติการกักเก็บน้ำเริ่มต้นที่มากกว่าคาร์ราจีแนน โดยน้ำในเจลลี่เล็กโทรไลต์มีผล โดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของไอออน Cu^{2+} และ Zn^{2+} ในเซลล์กัลวานิก ดังภาพที่ 27 ส่งผลต่อค่า ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Yang et al., 2022) หลังจาก 6 ชั่วโมง การกักเก็บน้ำของเจลาตินลดลงทำให้ ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการลดลงมากกว่าคาร์ราจีแนนและวุ้นผสมคาร์ราจีแนน ที่ อุณหภูมิ 25 °C เซลล์กัลวานิกเจลทั้ง 3 ประเภท มีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกัน

สรุปได้ว่า เซลล์กัลวานิกที่ได้จากเจลลี่เล็กโทรไลต์มีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าแม้ว่าผ่านไป 6 ชั่วโมง และลักษณะทางกายภาพของเซลล์กัลวานิกเจลลี่เล็กโทรไลต์เมื่อผ่านไป 6 ชั่วโมง พบว่า เจลลี่เล็กโทรไลต์ที่ได้จากคาร์ราจีแนน มีความเหมาะสมมากที่สุดในการทดลองเซลล์กัลวานิก จึงเป็น ตัวเลือกสำหรับการทดลองต่อไป



ภาพที่ 27 แสดงกระบวนการสร้างไฮโดรเจลและคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำเพื่อเป็นช่องทางการเคลื่อนที่ของไอออน

ที่มา : “Hydrogels Enable Future Smart Batteries.” โดย Yang, P., Yang, J. L., Liu, K., & Fan, H. J., 2022, *ACS Nano*, 16(10), หน้า 15529.

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่ใช้เตรียมเซลล์กัลวานิกประเภทเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้า

ศึกษาลักษณะทางกายภาพและความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ ที่ได้จากรสละลายอิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่ความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.00 mol/L ผสมกับคาร์ราจีแนน วัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C ได้ผลดังตารางที่ 5 - 6

ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพเจลอิเล็กโทรไลต์เซลล์กัลวานิกที่ความเข้มข้นต่างๆ หลัง 6 ชั่วโมง

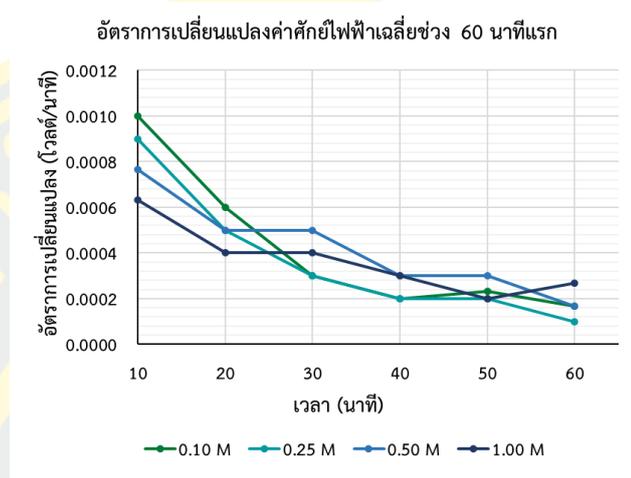
ลักษณะ	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)			
	0.10	0.25	0.50	1.00
ทางกายภาพ				
เจลอิเล็กโทรไลต์				
ขั้วโลหะ				

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นมากขึ้นเนื้อเจลอิเล็กโทรไลต์จะมีความแข็งแรง ความยืดหยุ่นลดลง การแข็งตัวและขึ้นรูปยากขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นซิลิก้า (Zn) กร่อนมากขึ้น และขั้วทองแดง (Cu) มีการสะสมของตะกอนทองแดงมากขึ้นบริเวณขั้วโลหะและในเนื้อเจล เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของไอออน Cu^{2+} และ Zn^{2+} ในสารละลายสูงมากขึ้น คาร์ราจีแนนจะแข็งตัวเกิดเป็นเจลได้ยากขึ้น โดย Cu^{2+} และ Zn^{2+} เป็นไอออนที่มีประจุ 2+ (Divalent cations) สามารถจับกับหมู่ซัลเฟตในโมเลกุลของ *K*-คาร์ราจีแนนได้ดีกว่า เนื่องจากมีความหนาแน่นประจุสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับไอออนประจุเดียว (monovalent ions) ส่งผลให้เจลมีความเรียบเนียนและสม่ำเสมอลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของ Zn^{2+} สูงทำให้เกิดเจลที่เสถียรและแข็งแรงโดยเนื้อเจลเปราะน้อยกว่าเจลที่มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} ที่สูง อาจทำให้เจลแข็งและเปราะเกินไป อีกทั้งทองแดงอาจมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลต่อสีและความคงตัวของเจลด้วย (Robal et al., 2017) เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6 เมื่อเริ่มต้นค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงใกล้เคียงกับ 1.10 V ที่สภาวะมาตรฐาน ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เข้มข้น 1.00 M, 0.50 M, 0.25 M และ 0.10 M เท่ากับ 1.092, 1.089, 1.081 และ 1.079 โวลต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของเจลอิเล็กโทรไลต์เซลล์กัลวานิกที่มีความเข้มข้นต่างๆ ที่ 25 °C

เวลา (นาที)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) ที่ความเข้มข้นต่างๆ			
	0.10 M	0.25 M	0.50 M	1.00 M
0	1.079	1.081	1.089	1.092
10	1.069	1.072	1.081	1.086
20	1.063	1.067	1.076	1.082
30	1.060	1.064	1.071	1.078
40	1.058	1.062	1.068	1.075
50	1.056	1.060	1.065	1.073
60	1.054	1.059	1.063	1.070
120	1.024	1.035	1.038	1.048
180	1.003	1.015	1.019	1.025
240	0.988	1.003	1.008	1.014
300	0.972	0.980	0.998	1.002
360	0.948	0.964	0.978	0.987

จากนั้นเมื่อต่อเซลล์ไว้ตลอดเวลาและวัดค่าความต่างศักย์ทุก ๆ 10 นาที พบว่า ในช่วง 10 นาทีแรกมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงจะช้าลง ดังภาพที่ 28 เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง มีอัตราการลดลงเฉลี่ย 2.93×10^{-4} , 3.06×10^{-4} , 3.25×10^{-4} และ 3.65×10^{-4} โวลต์ต่อนาที ตามลำดับ



ภาพที่ 28 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเจลอเล็กโทรไลต์ทั้ง 4 ความเข้มข้น จากค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นและหลังผ่านไป 6 ชั่วโมง

จะเห็นได้ว่าเซลล์กัลวานิกเจลอเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นมากมีอัตราการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าน้อย จากสมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation) เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เท่ากันภายใต้สภาวะสมดุล ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (E_{cell}) จะเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มาตรฐาน ($E_{\text{cell}}^0 = +1.100 \text{ V}$) สอดคล้องกับการศึกษาของ (Tan et al., 2020) ดังสมการ

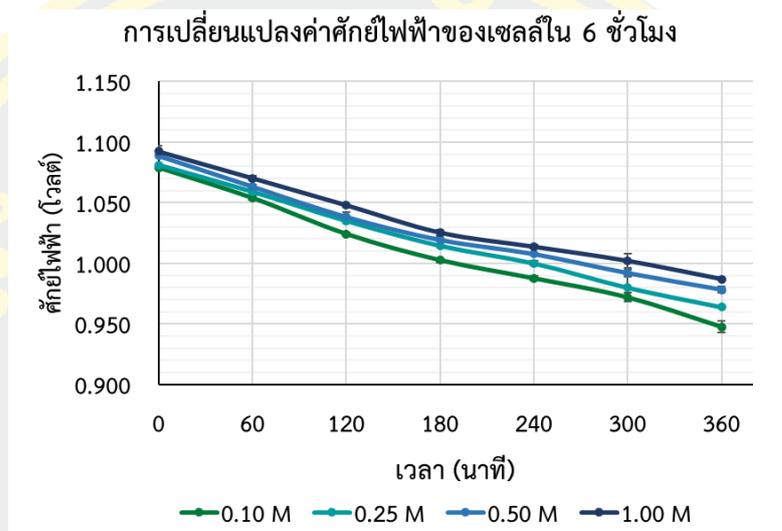
$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cell}}^0 - \frac{0.059}{n} \log Q \quad (5)$$

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cell}}^0 - \frac{0.059}{2} \log \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]}$$

$$E_{\text{cell}} = 1.100 - \frac{0.059}{2} \log \frac{[0.10]}{[0.10]}$$

$$E_{\text{cell}} = 1.100 \text{ V}$$

จากผลการทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั้ง 4 ความเข้มข้นเมื่อเริ่มต้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของสมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation) และมีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกัน เมื่อผ่านไป 6 ชั่วโมง ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ลดลงเท่ากับ 0.987, 0.978, 0.964 และ 0.948 ตามลำดับ ดังภาพที่ 29 มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) เท่ากับ 10.273, 11.061, 12.364 และ 13.848 ตามลำดับ

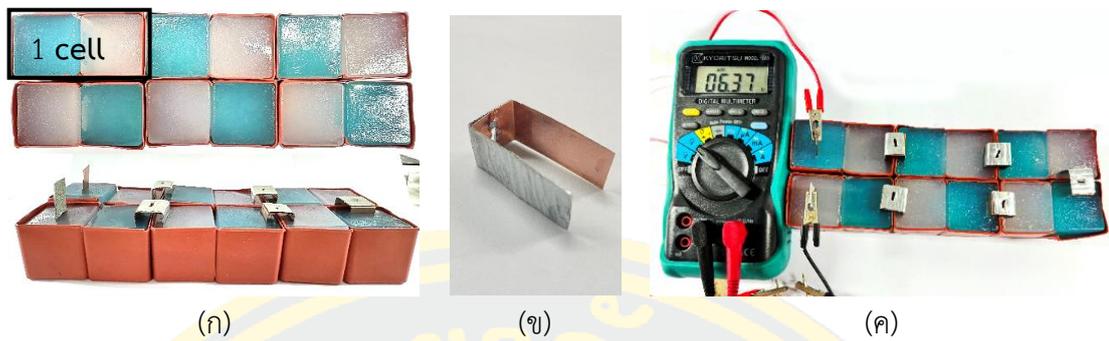


ภาพที่ 29 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั้ง 4 ความเข้มข้นจากค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นและหลังผ่านไป 6 ชั่วโมง

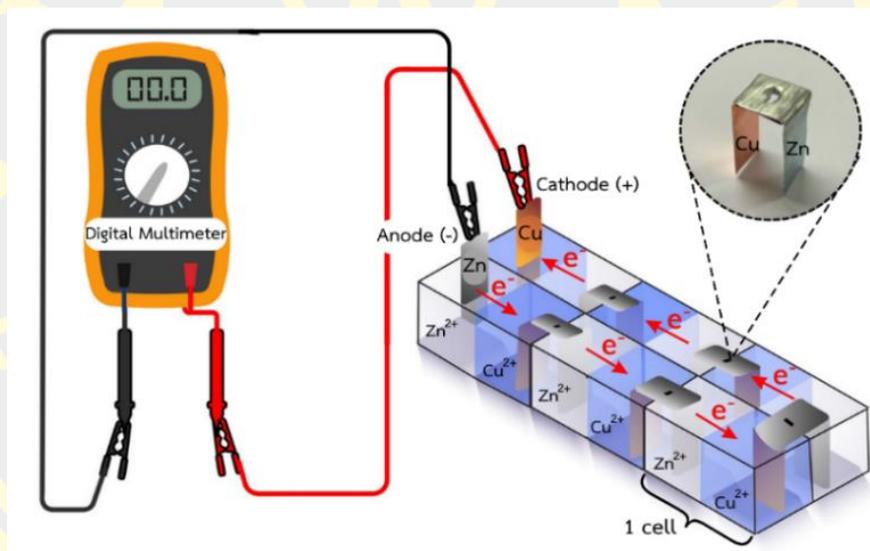
จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นน้อยที่สุด 0.10 M มีค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ต่างจากความเข้มข้นสูงๆ มากนัก และลักษณะทางกายภาพมีความเหมาะสมมากที่สุดในการทดลองเซลล์กัลวานิก เพื่อลดการใช้สารเคมีเข้มข้นสูงในการทดลอง ผู้วิจัยจึงเลือกความเข้มข้นน้อยที่สุด 0.10 M เพื่อออกแบบแบตเตอรี่จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในตอนต่อไป

ตอนที่ 4 การสร้างแบตเตอรี่จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์และทดสอบสมบัติความคงทนต่อค่าศักย์ไฟฟ้า

ศึกษาการสร้างแบตเตอรี่จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์จำนวน 6 เซลล์ โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 เข้มข้น 0.10 mol/L ผสมกับคาร์ราจีแนน และต่อวงจรอนุกรมของเซลล์กัลวานิกแต่ละเซลล์ด้วยขั้วไฟฟ้าสังกะสีและทองแดงที่เย็บติดกันด้วยคีมย้ำโลหะ จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 30 และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวงจรแบบอนุกรมของแบตเตอรี่เซลล์อิเล็กโทรไลต์ ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 30 ต้นแบบของแบตเตอรี่เซลล์เล็กโทรไลต์ (ก) วงจรอนุกรมของแบตเตอรี่เซลล์ 6 เซลล์ (ข) ขั้วโลหะสังกะสีและทองแดงที่เย็บติดกันด้วยคีมย้ำโลหะ (ค) การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่เซลล์เล็กโทรไลต์



ภาพที่ 31 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวงจรแบบอนุกรมของแบตเตอรี่เซลล์เล็กโทรไลต์ จำนวน 6 เซลล์

ที่มา : วาดโดยผู้วิจัยจากโปรแกรม canva

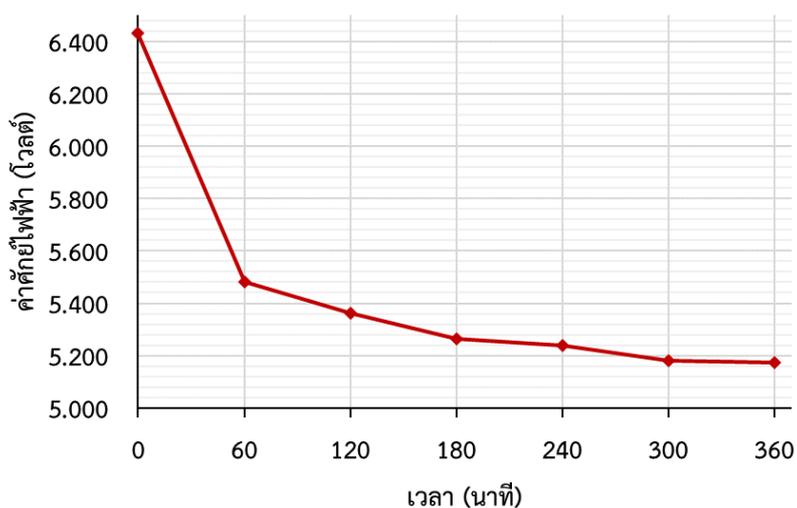
ทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที และชั่งน้ำหนักทุก ๆ 30 นาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมงที่ อุณหภูมิ 25 °C ได้ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยและร้อยละการสูญเสียน้ำของแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโพลีโพรไลนที่ 25 °C

เวลา	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย	%water loss
0	6.433	0
60	5.480	0.407
120	5.363	0.752
180	5.263	1.002
240	5.240	1.260
300	5.180	1.579
360	5.173	1.823

จากตารางที่ 7 เมื่อต่อเซลล์กัลวานิกเจลลี่เล็กโพลีโพรไลน เข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร จำนวน 6 เซลล์ ด้วยวงจรอนุกรมเป็นต้นแบบแบตเตอรี่วัดค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเริ่มต้นได้ 6.433 โวลต์ จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโพลีโพรไลนแปรผกผันกับร้อยละการสูญเสียน้ำของเซลล์ เมื่อต่อวงจรไว้จนครบ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงเหลือ 5.173 โวลต์ โดยมีแนวโน้มการลดลงดังภาพที่ 32 และมีอัตราการลดลงเฉลี่ย 3.5×10^{-3} โวลต์ต่อนาที และจะมีอัตราเร็วในช่วง 20 นาทีแรกจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงจะช้าลงและค่อนข้างคงที่

ค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโพลีโพรไลนใน 6 ชั่วโมง

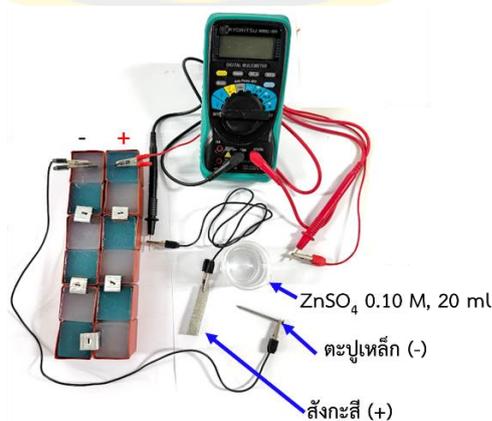


ภาพที่ 32 การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโพลีโพรไลนที่ 25 °C

ในการทดสอบความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้า จากการออกแบบแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ 6 เซลล์ เมื่อเริ่มต้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 6.433 โวลต์ ค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ควรจะได้เท่ากับ 6.474 โวลต์ (1.079 โวลต์/เซลล์ x 6 เซลล์) แบตเตอรี่มีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย 0.041 โวลต์ (41 mV) อาจเนื่องมาจากหลายเหตุผล เช่น การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของไอออนผ่านอิเล็กโทรไลต์ การสะสมของไอออนที่ขั้วไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่อมีการให้หรือรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าทำให้ไอออนในสารละลายต้องเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าตรงข้าม ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ โลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้ามีความต้านทานแตกต่างกัน ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (Tan et al., 2020) การใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถสร้างเซลล์กัลวานิกได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้สะพานเกลือ มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกับทฤษฎีสอดคล้องกับการศึกษาของ (Sosa et al., 2023) และมีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มากกว่า 6 ชั่วโมง อีกทั้งอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง (เจล) สามารถจัดวางในการต่อวงจรได้ง่าย และการใช้ขั้วไฟฟ้าทองแดงยึดติดกับสังกะสีช่วยให้ประหยัดเนื้อที่ ลดการใช้สายไฟ และออกแบบได้หลากหลายมากขึ้น ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาผลการนำแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟในการทดลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการทำโลหะให้บริสุทธิ์เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการใช้ถ่านไฟฉายปกติในห้องปฏิบัติการต่อไป

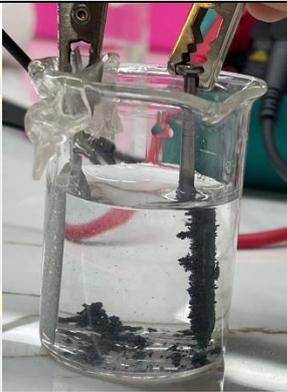
ตอนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพการชุบโลหะโดยใช้แบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์เทียบกับแบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย

ผู้วิจัยนำแบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่สร้างขึ้น นำมาเป็นแหล่งจ่ายไฟในการทดลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นปฏิบัติการที่นักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลายได้ทดลอง โดยหาประสิทธิภาพของการชุบเปรียบเทียบกับผลการชุบโดยใช้ถ่านไฟฉายเป็นแหล่งจ่ายไฟ จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 33 โดยชั่งน้ำหนักตะปูเหล็กและแผ่นสังกะสีก่อนและหลังชุบ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้น จากนั้นคำนวณหาปริมาณโลหะที่ชุบเคลือบผิวตะปูด้วยกฎฟาราเดย์ และหาผลได้ร้อยละเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชุบ ได้ผลดังตารางที่ 8



ภาพที่ 33 การจัดอุปกรณ์ในการทดลองชุบตะปูด้วยสังกะสี

ตารางที่ 8 การชุบตะปูด้วยไฟฟ้าโดยใช้แหล่งจ่ายไฟจากถ่านไฟฉายและแบตเตอรี่เจลอิลีกโทรไลต์

แหล่งจ่ายไฟ	การจัดชุดการทดลอง	การเกิดปฏิกิริยาขณะชุบ	พื้นผิวตะปูหลังชุบ
ถ่านไฟฉาย 1.5 โวลต์ 4 ก้อน (6 โวลต์)			
แบตเตอรี่เจลอิลีกโทรไลต์ 6 เซลล์			

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ถ่านไฟฉาย 1.5 โวลต์ 4 ก้อน (6 โวลต์) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาการชุบจะมีของแข็งสีดำเทาเกาะบริเวณผิวตะปูหนา และมีตะกอนอยู่ในสารละลายจำนวนมาก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าในการชุบ 5 นาที แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจากนั้นซับให้แห้งพบว่าพื้นผิวตะปูหลังชุบมีสีเทาเคลือบไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่การทดลองที่ใช้แบตเตอรี่เจลอิลีกโทรไลต์ 6 เซลล์ที่สร้างขึ้นมาเป็นแหล่งจ่ายไฟในการชุบพบว่า ในขณะที่ชุบไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ เมื่อล้างด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้ง พบว่าพื้นผิวตะปูหลังชุบมีสีเทาเคลือบสม่ำเสมอ ผิวเรียบ โดยมีผลการชั่งน้ำหนักตะปูและสังกะสีก่อนและหลังการชุบ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการชุบจากผลได้ร้อยละดังตารางที่ 9 – 10

ตารางที่ 9 น้ำหนักของตะปูและสังกะสีก่อนและหลังชุบด้วยไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟ	ครั้งที่	น้ำหนักตะปูเหล็ก (g)			น้ำหนักโลหะสังกะสี (g)		
		ก่อน	หลัง	เพิ่มขึ้น	ก่อน	หลัง	ลดลง
ถ่านไฟฉาย 1.5	1	2.5255	2.5270	0.0015	3.3550	3.3400	0.0150
โวลต์ 4 ก้อน (6 โวลต์)	2	2.5164	2.5177	0.0013	3.0890	3.0693	0.0197
	3	2.5226	2.5236	0.0010	3.4094	3.3944	0.0150
	เฉลี่ย	2.5215	2.5228	0.0013	3.2845	3.2679	0.0166
	SD	0.0038	0.0038	0.0002	0.1400	0.1422	0.0022
แบตเตอรี่เจด	1	2.5316	2.5340	0.0024	3.6062	3.6044	0.0018
อิเล็กทรอนิกส์ 6 เซลล์	2	2.5085	2.5107	0.0022	3.3155	3.3135	0.0020
	3	2.5261	2.5291	0.0030	3.1766	3.1727	0.0039
	เฉลี่ย	2.5221	2.5246	0.0025	3.3661	3.3635	0.0026
	SD	0.0099	0.0100	0.0003	0.1790	0.1798	0.0009

จากกฎฟาราเดย์ “ปริมาณของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าใดขั้วไฟฟ้าหนึ่งในเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะแปรตามปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านมายังเซลล์นี้”

$$Q = It \quad (6)$$

โดย $Q =$ ประจุไฟฟ้า (C)

$I =$ กระแสไฟฟ้า (A)

$t =$ เวลาที่ให้กระแสไฟฟ้า (s)

จากตารางที่ 10 นำค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของการทดลองที่ใช้ถ่านไฟฉาย 6 โวลต์ มาคำนวณหาประจุไฟฟ้า (Q) ได้ดังนี้

$$Q = It$$

$$Q = 0.1527 (5 \times 60)$$

$$Q = 45.81 \text{ C}$$

เมื่อคำนวณหา Q แล้ว สามารถนำไปคำนวณหาน้ำหนักโลหะที่เกาะที่ขั้วไฟฟ้าได้

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ (1F) หรือ 96,485 C จะทำให้เกิดสารที่ขั้วไฟฟ้าหนักเท่ากับ 1 กรัมสมมูล

$$1 \text{ กรัมสมมูล} = \frac{\text{มวลของสาร 1 โมล (กรัม)}}{\text{จำนวนอิเล็กตรอนที่ให้หรือรับ}}$$

ในการทดลองนี้เกิดโลหะสังกะสี (Zn) ที่ขั้วไฟฟ้า ดังสมการ $Zn^{2+} (gel) + 2e^- \rightarrow Zn (s)$
มวลอะตอมของสังกะสี เท่ากับ 65.38 กรัม/โมล จะเกิดโลหะสังกะสีหนัก

$$1 \text{ กรัมสมมูล} = \frac{65.38 \text{ g}}{2} = 32.69 \text{ กรัม}$$

สามารถหาผลได้ร้อยละเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชุบตะปูด้วยสังกะสีเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ $ZnSO_4$ เข้มข้น 0.10 M คำนวณได้ดังนี้

ถ้าใช้ปริมาณไฟฟ้า 96,485 C จะทำให้เกิดโลหะสังกะสี หนัก 32.69 กรัม

$$\begin{aligned} \text{หากใช้ปริมาณไฟฟ้า 45.81 C จะทำให้เกิดโลหะสังกะสี หนัก} &= \frac{32.69 \text{ g} \times 45.81 \text{ C}}{96,485 \text{ C}} \\ &= 0.0155 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากการศึกษาในครั้งนี้น้ำหนักของสังกะสีที่ขั้วไฟฟ้า ดังตารางที่ 9 ได้จากน้ำหนักของตะปูเหล็กหลังการชุบที่เพิ่มขึ้นนำผลต่างมาคำนวณหาปริมาณผลได้ร้อยละ ดังนี้

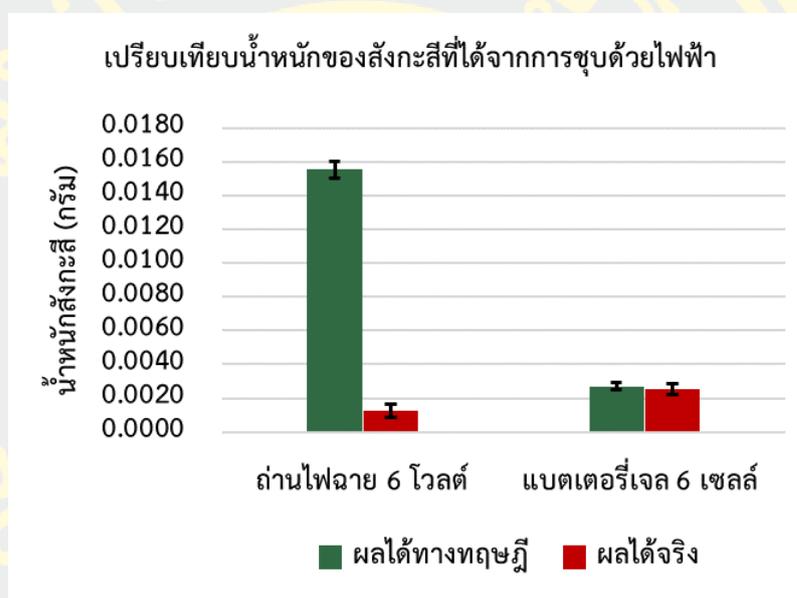
$$\begin{aligned} \text{ผลได้ร้อยละ (\%Yield)} &= \frac{\text{ผลได้จริง}}{\text{ผลได้ทางทฤษฎี}} \times 100 \\ &= \frac{0.0013}{0.0155} \times 100 \\ &= 8.2044 \% \end{aligned} \quad (7)$$

ใช้วิธีเดียวกันในการคำนวณผลได้ร้อยละของสังกะสีจากการทดลองโดยใช้แบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ 6 เซลล์ ได้ผล ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลได้ร้อยละของสังกะสีที่ผิวตะปูจากการชุบด้วยไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟ	ครั้งที่	I (A)	t = 300 s	น้ำหนักสังกะสีที่เกิด		ผลได้ร้อยละ
			Q = It (C)	ทางทฤษฎี	ผลได้จริง	
ถ่านไฟฉาย 1.5	1	0.146	43.8	0.0148	0.0015	10.1079
โวลต์ 4 ก้อน (6 โวลต์)	2	0.156	46.8	0.0159	0.0013	8.1987
	3	0.156	46.8	0.0159	0.0010	6.3067
	เฉลี่ย	0.153	45.8	0.0155	0.0013	8.2044
	SD	0.005	1.41	0.0005	0.0002	1.5519

แหล่งจ่ายไฟ	ครั้งที่	I (A)	t = 300 s	น้ำหนักสังกะสีที่เกิด		ผลได้ร้อยละ
			Q = It (C)	ทางทฤษฎี	ผลได้จริง	
แบตเตอรี่เจล	1	0.025	7.5	0.0025	0.0024	94.4485
อิเล็กทรอนิกส์	2	0.023	6.9	0.0023	0.0022	94.1063
6 เซลล์	3	0.032	9.6	0.0033	0.0030	92.2343
	เฉลี่ย	0.027	8.0	0.0027	0.0025	93.5965
	SD	0.004	1.16	0.0004	0.0003	0.9729



ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบผลได้จริงและผลได้ทางทฤษฎีที่ได้หลังการชุบตะปูเหล็กด้วยไฟฟ้า

จากตารางที่ 9 พบว่าเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวตะปูที่เท่ากัน หากใช้ถ่านไฟฉาย 6 โวลต์เป็นแหล่งจ่ายไฟในการชุบซึ่งมีปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) และประจุไฟฟ้า (Q) มากกว่าแบตเตอรี่เจลจำนวน 6 เซลล์ ได้น้ำหนักตะปูเหล็กที่ชุบสังกะสีเพิ่มขึ้นน้ำหนัก 0.0013 กรัม และ 0.0025 กรัม ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบผลได้ร้อยละที่คำนวณจากกฎของฟาราเดย์ ดังตารางที่ 10 เมื่อใช้แบตเตอรี่เจล 6 เซลล์ เป็นแหล่งจ่ายไฟมีผลได้ร้อยละ 93.5965 บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการชุบที่สูงกว่าการใช้ถ่านไฟฉาย 6 โวลต์ที่มีผลได้ร้อยละ 8.2044 ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังภาพที่ 34 เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่มาคำนวณหาความหนาแน่นกระแสจาก

$$J = \frac{I}{A} \quad (8)$$

โดย J คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (A/cm^2)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในเซลล์ (A)

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่จะชุบ (cm^2)

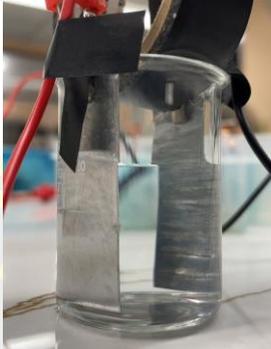
ในการทดลองนี้พื้นที่ผิวของตะปูเฉลี่ยเท่ากับ 2.578 cm^2 เมื่อคำนวณความหนาแน่นของกระแสของถ่านไฟฉายและแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์ เท่ากับ 0.059 A/cm^2 และ 0.010 A/cm^2 ตามลำดับ แบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์มีความหนาแน่นกระแสที่ต่ำกว่าผลการชุบเคลือบตะปูที่มีพื้นที่ผิวที่เรียบสม่ำเสมอ ตามกฎของฟาราเดย์อิเล็กโทรไลซิส (Faraday's laws of electrolysis) ปริมาณของโลหะที่สะสมที่ขั้ว จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้และส่งผลให้ความหนาแน่นของการเคลือบ แต่หากปริมาณกระแสไฟฟ้ามากเกินไป ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแส (J) สูงเกินไป เกิดการเคลือบที่หยาบ ไม่สม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะไม่ดี (Ebru Saraloğlu, 2016)

ตอนที่ 6 การศึกษาประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่จากเจลลี่เล็กโทรไลต์เทียบกับแบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย

ศึกษาผลของแบตเตอรี่จากเจลลี่เล็กโทรไลต์ที่สร้างขึ้น นำมาเป็นแหล่งจ่ายไฟในการทดลองการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า โดยแยกสังกะสีออกจากแผ่นเมทัลลิต (AZ70 อลูซิงค์ 0.23 มม.) ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ 0.10 M และหาประสิทธิภาพของการทำให้บริสุทธิ์ที่ใช้แบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์เปรียบเทียบกับการใช้ถ่านไฟฉายเป็นแหล่งจ่ายไฟ โดยชั่งน้ำหนักแผ่นเมทัลลิตและแผ่นสังกะสีก่อนและหลังการทำให้บริสุทธิ์ นำมาคำนวณหาปริมาณโลหะสังกะสีที่แยกได้ด้วยกฎฟาราเดย์ และหาผลได้ร้อยละเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ ได้ผลดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การทดลองการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าโดยใช้แหล่งจ่ายไฟจากถ่านไฟฉายและแบตเตอรี่เจลลี่เล็กโทรไลต์

แหล่งจ่ายไฟ	การจัดชุดการทดลอง	ลักษณะการเกิดปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวโลหะหลังการทดลอง
ถ่านไฟฉาย 1.5 โวลต์ 4 ก้อน (6 โวลต์)			
			เมทัลลิต
			สังกะสี

แหล่งจ่ายไฟ	การจัดชุดการทดลอง	ลักษณะการเกิดปฏิกิริยา	พื้นผิวโลหะหลังการทดลอง
แบตเตอรี่เจอร์เซลล์ อเล็กโทรไลต์ 6 เซลล์			 เมทัลซีท สังกะสี

จากตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ถ่านไฟฉาย 1.5 โวลต์ 4 ก้อน (6 โวลต์) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาแผ่นโลหะเมทัลซีทเกิดฟองแก๊สจำนวนมาก แผ่นสังกะสีมีของแข็งสีดำเทาเกาะบริเวณผิวหน้าขึ้น และตกตะกอนอยู่ในสารละลาย เมื่อผ่านการชุบ 10 นาที นำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้ง พบว่า พื้นผิวเมทัลซีทกร่อนและบางลงจนเห็นพื้นผิวสีดำด้านใน ส่วนพื้นผิวสังกะสีส่วนที่จุ่มในสารละลายมีสีเทาเคลือบแตกต่างจากส่วนที่อยู่เหนือสารละลายเล็กน้อย ในขณะที่การทดลองที่ใช้แบตเตอรี่เจอร์เซลล์อเล็กโทรไลต์ 6 เซลล์ที่สร้างขึ้นมาเป็นแหล่งจ่ายไฟในการทดลองพบว่า ในขณะที่ทดลองเกิดฟองแก๊สเล็กน้อยบริเวณผิวเมทัลซีท ส่วนแผ่นสังกะสีไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ เมื่อผ่านไป 10 นาทีนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้ง พบว่าพื้นผิวเมทัลซีทสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวสังกะสีส่วนที่จุ่มในสารละลายมีสีเทาเคลือบแตกต่างจากส่วนที่อยู่เหนือสารละลายเล็กน้อย ผู้วิจัยได้ชั่งเมทัลซีทและสังกะสีก่อนและหลังการทดลอง เพื่อกำหนดหาผลได้ร้อยละ ดังตารางที่ 12 – 13

ตารางที่ 12 น้ำหนักของโลหะสังกะสีและแผ่นเมทัลซีทก่อนและหลังทำให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟ	ครั้งที่	น้ำหนักโลหะสังกะสี (g)			น้ำหนักเมทัลซีท (g)		
		ก่อน	หลัง	เพิ่มขึ้น	ก่อน	หลัง	ลดลง
ถ่านไฟฉาย 1.5 โวลต์ 4 ก้อน (6 โวลต์)	1	3.1062	3.1118	0.0056	2.3622	2.3432	0.0190
	2	3.3029	3.3081	0.0052	2.3730	2.3522	0.0208
	3	3.3348	3.3383	0.0035	2.1798	2.1601	0.0197
	เฉลี่ย	3.2190	3.2232	0.0048	2.3063	2.2851	0.0198
	SD	0.1011	0.1004	0.0009	0.0886	0.0885	0.0007

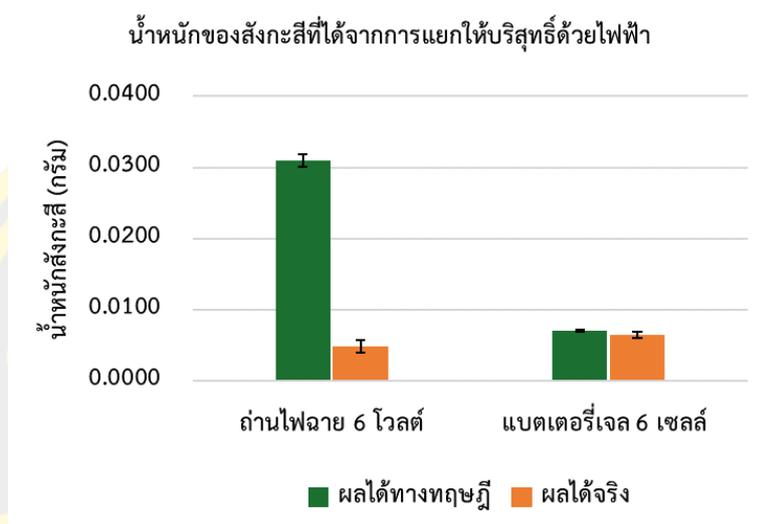
แหล่งจ่ายไฟ	ครั้งที่	น้ำหนักโลหะสังกะสี (g)			น้ำหนักเมทัลลิก (g)		
		ก่อน	หลัง	เพิ่มขึ้น	ก่อน	หลัง	ลดลง
แบตเตอรี่เจล	1	3.3957	3.4026	0.0069	2.2701	2.2656	0.0045
อิเล็กทรอนิกส์	2	3.1139	3.1202	0.0063	2.3071	2.3022	0.0049
6 เซลล์	3	3.4104	3.4163	0.0059	2.1629	2.157	0.0059
	เฉลี่ย	3.3022	3.3085	0.0064	2.2654	2.2607	0.0051
	SD	0.1184	0.1185	0.0004	0.0621	0.0628	0.0006

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบผลได้ร้อยละของน้ำหนักสังกะสีที่ได้จากการทำให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟ	ครั้งที่	I (A)	t = 600 s	น้ำหนักสังกะสี		ผลได้ร้อยละ
			Q = It (C)	ทางทฤษฎี	ผลได้จริง	
ถ่านไฟฉาย 1.5	1	0.156	93.6	0.0317	0.0056	17.6586
โวลต์ 4 ก่อน (6 โวลต์)	2	0.146	87.6	0.0297	0.0052	17.5204
	3	0.154	92.4	0.0313	0.0035	11.1800
	เฉลี่ย	0.152	91.2	0.0309	0.0048	15.4530
	SD	0.0043	2.5923	0.0009	0.0009	3.0220
แบตเตอรี่เจล	1	0.034	20.4	0.0069	0.0069	99.8306
อิเล็กทรอนิกส์	2	0.034	20.4	0.0069	0.0063	91.1497
6 เซลล์	3	0.036	21.6	0.0073	0.0059	80.6201
	เฉลี่ย	0.0347	20.8000	0.0070	0.0064	90.5335
	SD	0.0009	0.5657	0.0002	0.0004	7.8548

จากตารางที่ 12 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ถ่านไฟฉาย 6 โวลต์และแบตเตอรี่เจลอิเล็กทรอนิกส์ 6 เซลล์เป็นแหล่งจ่ายไฟในการทดลอง น้ำหนักของแผ่นเมทัลลิกทดลองเฉลี่ย 0.0198 กรัม และ 0.0051 กรัม ตามลำดับ ส่วนสังกะสีมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.0048 กรัม และ 0.0064 กรัม ตามลำดับ จะเห็นว่าถึงแม้การใช้ถ่านไฟฉาย 6 โวลต์ในการทดลอง ทำให้น้ำหนักของเมทัลลิกทดลองมากกว่าแต่น้ำหนักของสังกะสีที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า จากตารางที่ 4.13 ถ่านไฟฉายและแบตเตอรี่เจลอิเล็กทรอนิกส์มีกระแส (I) เฉลี่ย 0.152 แอมแปร์ และ 0.0347 แอมแปร์ ตามลำดับ

ผลได้ร้อยละเฉลี่ยจากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์ เท่ากับ 15.4530 และ 90.5335 ตามลำดับ เปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 35 เมื่อนำพื้นที่ผิวของสังกะสีส่วนที่จุ่มในสารละลายเท่ากับ 9.92 cm^2 จำนวนความหนาแน่นของกระแส (J) ได้เท่ากับ 0.0153 A/cm^2 และ 0.0035 A/cm^2 ตามลำดับ



ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบผลได้จริงและผลได้ทางทฤษฎีที่ได้จากการแยกเมทัลซีทด้วยไฟฟ้าจากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์

สรุปได้ว่าการใช้กระแส ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสต่ำของแบตเตอรี่เจลอิเล็กทรอนิกส์สามารถรักษาอัตราการสะสมและความบริสุทธิ์ของสังกะสีที่ขั้วแคโทดได้มากกว่าถ่านไฟฉาย ทำให้สามารถสะสมสังกะสีที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น และลดโอกาสเกิดการสะสมตัวของสิ่งเจือปนน้อยลง การใช้ถ่านไฟฉายที่มีกระแสไฟฟ้าสูงเกินไปทำให้ขั้วโลหะเกิดปฏิกิริยารุนแรง กร่อนและสึกหรอเร็ว (Ri et al., 2023) ส่งผลให้การยัดเกาะที่ขั้วโลหะบริสุทธิ์ไม่ดี

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่องชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่ายที่ทำจากเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ คือ วุ้น (Agar) คาร์ราจีแนน (Carrageenan) และเจลาติน (Gelatin) ผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (CuSO_4) และซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) ให้อยู่ในรูปแบบเจลอิเล็กโทรไลต์ นำมาประยุกต์ใช้สร้างชุดการทดลองทางเคมีไฟฟ้าอย่างง่าย การวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละประเภท การสร้างแบตเตอรี่อย่างง่ายจากเซลล์กัลวานิกที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ การหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้นใหม่โดยประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานจ่ายไฟฟ้าทดแทนถ่านไฟฉายในห้องปฏิบัติการ ในการทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งประกอบด้วย การหาประสิทธิภาพของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และการหาประสิทธิภาพของการทำโลหะให้บริสุทธิ์ การใช้เจลอิเล็กโทรไลต์จะช่วยลดการใช้สารเคมีที่มีความเข้มข้นสูงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และบูรณาการเนื้อหาเพื่อให้เข้าใจความรู้พื้นฐานและนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในชีวิตจริง

สรุปผลการวิจัย

1. สมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์

1.1 ร้อยละการสูญเสียน้ำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากการผสมสารละลาย CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่ความเข้มข้น 1.00 โมลต่อลิตรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ 3 ชนิด เจลอิเล็กโทรไลต์เจลาตินมีการสูญเสียน้ำมากที่สุดตามด้วยคาร์ราจีแนน และวุ้นผสมคาร์ราจีแนน โดยประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำในเจลขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในโมเลกุลคือ เจลาตินเป็นโปรตีนที่ได้จากการแปรรูปคอลลาเจน โครงสร้างแบบ triple helix ของคอลลาเจนช่วยให้เจลาตินมีความยืดหยุ่นสามารถกักเก็บโมเลกุลน้ำได้ (Schrieber & Gareis, 2007) แต่น้อยกว่าคาร์ราจีแนนที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์มีโมเลกุลกลุ่มซัลเฟตกลุ่มน้ำตาลหลายชนิดสามารถสร้างเจลที่มีความแข็งแรง และช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี (Robal et al., 2017) ส่วนเจลวุ้นจะเกิดการแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันของ Double helices ของสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Khadija et al., 2005) จึงต้องผสมกับคาร์ราจีแนนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกักเก็บน้ำให้ดีขึ้น

1.2 เซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์จากเจลาตินให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นสูงที่สุดมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี 1.10 V ที่สภาวะมาตรฐาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Sosa et al., 2023) เนื่องจากคุณสมบัติการกักเก็บน้ำเริ่มต้นที่มากกว่าคาร์ราจีแนน โดยน้ำในเจลอิเล็กโทรไลต์มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของไอออน Cu^{2+} และ Zn^{2+} ในเซลล์กัลวานิก ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Yang et al., 2022) หลังจาก 6 ชั่วโมง การกักเก็บน้ำของเจลาตินลดลงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการลดลงมากกว่าคาร์ราจีแนนและวุ้นผสมคาร์ราจีแนน ที่อุณหภูมิ 25 °C เซลล์กัลวานิกเจลทั้ง 3 ประเภท มีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกัน โดยเจลจากคาร์ราจีแนน ลักษณะทางกายภาพเหมาะสมมากที่สุดในการทดลองเซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์

1.3 เซลล์กัลวานิกเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีของ CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่ความเข้มข้น 1.00, 0.50, 0.25 และ 0.10 โมลต่อลิตรผสมกับคาร์ราจีแนน เมื่อความเข้มข้นของไอออน Cu^{2+} และ Zn^{2+} ในสารละลายสูงมากขึ้น คาร์ราจีแนนจะแข็งตัวเกิดเป็นเจลได้ยากขึ้น โดย Cu^{2+} และ Zn^{2+} เป็นไอออนที่มีประจุ 2+ (Divalent cations) สามารถจับกับหมู่ซัลเฟตในโมเลกุลของ **K**-คาร์ราจีแนนได้ดีกว่า เนื่องจากมีความหนาแน่นประจุสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับไอออนประจุเดียว (monovalent ions) ส่งผลให้เจลมีความเรียบเนียนและสม่ำเสมอลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของ Zn^{2+} สูงทำให้เกิดเจลที่เสถียรและแข็งแรงโดยเนื้อเจลเปราะน้อยกว่าเจลที่มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} ที่สูง อาจทำให้เจลแข็งและเปราะเกินไป ทองแดงอาจมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลต่อสีและความคงตัวของเจลด้วย (Fogde et al., 2020; Robal et al., 2017) จากผลการทดลองเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากคาร์ราจีแนนจากสมการของเนินสต์ (Nernst Equation) ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เท่ากัน ค่าศักย์ของเซลล์ (E_{cell}) จะเท่ากับศักย์ของเซลล์มาตรฐาน ($E_{\text{cell}}^0 = +1.100 \text{ V}$) สอดคล้องกับการศึกษาของ (Tan et al., 2020)

2. การสร้างแบตเตอรี่จากเจลอิเล็กโทรไลต์ 6 เซลล์ ที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ CuSO_4 และ ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร ผสมกับคาร์ราจีแนน ปรับปรุงจากงานวิจัยของ (Tan et al., 2020) พบว่า การใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถสร้างเซลล์กัลวานิกได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้สะพานเกลือ มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกับทฤษฎีสอดคล้องกับการศึกษาของ (Sosa et al., 2023) และมีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มากกว่า 6 ชั่วโมง อีกทั้งยังพบว่าแบตเตอรี่มีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากเหตุผลหลายประการ เช่น การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของไอออน การสะสมของไอออนที่ขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ โลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า เป็นต้น การใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง (เจล) สามารถจัดวางในการต่อวงจรได้ง่าย และการใช้ขั้วไฟฟ้าทองแดงยับยั้งกับสังกะสีช่วยให้เพื่อประหยัดเนื้อที่ ลดการใช้สายไฟ และออกแบบรูปร่างได้หลากหลายมากขึ้น

3. การทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่เจลที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับถ่านไฟฉายที่มีจำนวนโวลต์ใกล้เคียงกันประมาณ 6 โวลต์ เป็นแหล่งจ่ายไฟในการทดลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และการทำโลหะให้บริสุทธิ์ แบตเตอรี่เจลและถ่านไฟฉายที่มีศักย์ไฟฟ้า (V) ใกล้เคียงกัน แต่แบตเตอรี่เจลมีกระแสไฟฟ้า (I) น้อยกว่าถ่านไฟฉายหลายเท่า ผลการทดลองพบว่า การใช้แบตเตอรี่เจลที่สร้างขึ้นเป็นแหล่งจ่ายไฟทำให้ผลได้ร้อยละ (% Yield) มากกว่าการใช้ถ่านไฟฉายทั้ง 2 การทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

3.1 การทดลองการชุบตะปูโลหะด้วยสังกะสี ตามกฎของฟาราเดย์อิเล็กโทรไลซิส (Faraday's laws of electrolysis) ปริมาณของโลหะที่สะสมที่ขั้ว จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้และส่งผลให้ความหนาของการเคลือบ แต่หากปริมาณกระแสไฟฟ้ามากเกินไป ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแส (J) สูงเกินไป เกิดการเคลือบที่หยاب ไม่สม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะไม่ดีสอดคล้องกับการศึกษาของ (Ebru Saraloğlu, 2016)

3.2 การทดลองการทำโลหะเมทัลลิก (AZ70 อลูมิเนียม 0.23 มม.) ให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า การใช้กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสต่ำของแบตเตอรี่เจล สามารถรักษาอัตราการสะสมและความบริสุทธิ์ของสังกะสีที่ขั้วแคโทดได้มากกว่าถ่านไฟฉาย ทำให้สามารถสะสมสังกะสีที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น และลดโอกาสเกิดการสะสมตัวของสิ่งเจือปนน้อยลง การใช้ถ่านไฟฉายที่มีกระแสไฟฟ้าสูงเกินไปทำให้เมทัลลิกเกิดปฏิกิริยารุนแรง กร่อนและสึกหรอเร็ว สอดคล้องกับการศึกษาของ (Ri et al., 2023)

จากที่กล่าวข้างต้นแบตเตอรี่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่สร้างขึ้นจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 0.10 mol/L มีประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าถ่านไฟฉายที่มีความต่างศักย์ใกล้เคียงกัน ด้วยสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำ มีความโปร่งใส ความคงตัวสูง อีกทั้งสมบัติเป็น Thermoreversible gel ที่สามารถเปลี่ยนกลับมาเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหมาะสำหรับการประยุกต์นำของเสียมาใช้ใหม่ตามหลักเคมีสีเขียว

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. การนำเจลอิเล็กโทรไลต์ไปใช้ในการจัดการเรียนรู้เคมีไฟฟ้า เรื่องเซลล์กัลวานิก ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ควรใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากคาร์ราจีแนน เนื้อเจลมีความใส แข็งตัว และยึดหยุดได้ดี สามารถทนต่ออุณหภูมิมากกว่า 25 °C ได้และให้ค่าศักย์ไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับทฤษฎี

2. สามารถลดหรือเพิ่มขนาดของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลองเซลล์กัลวานิกหรือสร้างแบตเตอรี่ได้ ขนาดของเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้า แต่มีผลต่อความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าในเวลาที่เท่ากัน

3. การปักขั้วโลหะไฟฟ้าไม่ควรปักจนทะลุเจลด้านล่าง จะทำให้ Cu^{2+} เข้ารับอิเล็กตรอนจากขั้วสังกะสีโดยตรง ส่งผลให้ด้านล่างของขั้วสังกะสีกร่อนเร็วขึ้น มีความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้าลดลง

ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

1. ควรศึกษาสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่อุณหภูมิมากกว่า $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. ออกแบบการจัดการเรียนรู้วิชาเคมีจากการใช้เจลอิเล็กโทรไลต์แทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย



บรรณานุกรม

- Armand, M., Endres, F., Macfarlane, D. R., Ohno, H., & Scrosati, B. (2009). Ionic-liquid materials for the electrochemical challenges of the future. *Nature materials*, 8, 621-629.
- Arnold, N. A., & Kyasa, S. K. (2023). Electronic Half-Cell Module to Demonstrate an Electrochemical Series and a Citrus Fruit Battery for Remote Students. *Journal of Chemical Education*, 100(9), 3739-3743. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00239>
- Brosmer, J. L., & Peters, D. G. (2012). Galvanic Cells and the Determination of Equilibrium Constants. *Journal of Chemical Education*, 89(6), 763-766. <https://doi.org/10.1021/ed2004643>
- Chatmontree, A., Chairam, S., Supasorn, S., Amatatongchai, M., Jarujamrus, P., Tamuang, S., & Somsook, E. (2015). Student Fabrication and Use of Simple, Low-Cost, Paper-Based Galvanic Cells To Investigate Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 92(6), 1044-1048. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00117>
- Chia, V. Y. Y., Hölltä-Otto, K., & Anariba, F. (2022). Using the Electrochemistry Designette to Visualize Students' Competence and Misconceptions on Electrochemical Principles. *Journal of Chemical Education*, 99(3), 1533-1538. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00773>
- Dai, B., & Matsukawa, S. (2012). NMR studies of the gelation mechanism and molecular dynamics in agar solutions. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 181-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.021>
- Ebru Saraloğlu, G. I. (2016). Effects of Electroplating Characteristics on the Coating Properties. In M. A. M. Adel & D. G. Teresa (Eds.), *Electrodeposition of Composite Materials* (pp. Ch. 2). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61745>
- Engen, P.-O., & Skaugrud, B. (2015). An Easy-To-Assemble Three-Part Galvanic Cell. *Journal of Chemical Education*, 92(6), 1053-1055. <https://doi.org/10.1021/ed500726y>
- Fogde, A., Kurten, B., Sandberg, T., & Huynh, T. P. (2020). Colorimetric Hydrogel from

- Natural Indicators: A Tool for Electrochemistry Education. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3702-3706. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00440>
- Grønneberg, T., Kvittingen, L., & Eggen, P.-O. (2006). Small-Scale and Low-Cost Galvanic Cells. *Journal of Chemical Education*, 83(8), 1201. <https://doi.org/10.1021/ed083p1201>
- Intaraprasit, M., Tawornparcha, P., Veerapong, P., & Limpanuparb, T. (2023). Intuitive Small-Scale Electrochemistry on 24-Well Plate and 3D-Printed Cover Yielding Accurate Results. *Journal of Chemical Education*, 100(8), 3144-3150. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00356>
- Karim, A. A., & Bhat, R. (2009). Fish gelatin: properties, challenges, and prospects as an alternative to mammalian gelatins. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 563-576. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.07.002>
- Karpudewan, M., & Daman Huri, N. H. (2022). Interdisciplinary Electrochemistry STEM-Lab Activities Replacing the Single Disciplinary Electrochemistry Curriculum for Secondary Schools. *Journal of Chemical Education*, 100(2), 998-1010. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00469>
- Khadija, L., Safouane, A., & Peyrelasse, J. (2005). Sol State Formation and Melting of Agar Gels Rheological Study. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 358, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.06.022>
- Koczoń, P., Josefsson, H., Michorowska, S., Tarnowska, K., Kowalska, D., Bartyzel, B. J., . . . Gruczyńska-Sełkowska, E. (2022). The Influence of the Structure of Selected Polymers on Their Properties and Food-Related Applications. *Polymers*, 14(10), 1962. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/10/1962>
- Kruk, K., & Winnicka, K. (2022). Alginates Combined with Natural Polymers as Valuable Drug Delivery Platforms. *Marine Drugs*, 21, 11. <https://doi.org/10.3390/md21010011>
- Kumar, V., & Fotedar, R. (2009). Agar extraction process for *Gracilaria cliftonii* (Withell, Millar, & Kraft, 1994). *Carbohydrate Polymers*, 78(4), 813-819. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.001>
- Łabowska, M., Cierluk, K., Jankowska, A., Kulbacka, J., Detyna, J., & Michalak, I. (2021). A

- Review on the Adaption of Alginate-Gelatin Hydrogels for 3D Cultures and Bioprinting. *Materials*, 14, 858. <https://doi.org/10.3390/ma14040858>
- Lim, J., Pei, C., Hanry, E., Mansa, R., Moh, P., Hsiang, T., & Surugau, N. (2022). *Reinforced biopolymers from Seaweed using Plant-Based Celluloses -A Review*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23586.91840>
- Masakuni, T., Tamaki, Y., Teruya, T., & Takeda, Y. (2014). The Principles of Starch Gelatinization and Retrogradation. *Food and Nutrition Sciences*, 05, 280-291. <https://doi.org/10.4236/fns.2014.53035>
- Origin and molecular structure of gelatin*. <https://theory.labster.com/gelatin/>
- Prasad, P. V. V., Staggenborg, S., & Ristic, Z. (2008). Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. *Advances in Agricultural Systems Modeling Series*, 1, 301-355.
- Ri, V. E., Yoo, B. U., Nersisyan, H., & Lee, J. H. (2023). Carbon-Free Recovery Route for Pure Ti: CuTi-Alloy Electrorefining in a K-Free Molten Salt. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(4), 1414-1427. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05883>
- Robal, M., Brenner, T., Matsukawa, S., Ogawa, H., Truus, K., Rudolph, B., & Tuvikene, R. (2017). Monocationic salts of carrageenans: Preparation and physico-chemical properties. *Food Hydrocolloids*, 63, 656-667. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.032>
- Schrieber, R., & Gareis, H. (2007). *Gelatine Handbook: Theory and Industrial Practice*. I-XII. <https://doi.org/10.1002/9783527610969.fmatter>
- Sekhon, S., & Missan, H. (2002). Ionic conductivity of PVdF-based polymer gel electrolytes. *Solid State Ionics*, 152, 169-174. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(02\)00296-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(02)00296-5)
- Simoska, O., & Minter, S. D. (2021). *Techniques in Electroanalytical Chemistry* [doi:10.1021/acsinfocus.7e5021]. American Chemical Society. <https://doi.org/doi:10.1021/acsinfocus.7e5021>
- Sosa, G. L., Deluchi, G. E., Ramirez, S. A., & Hamer, M. (2023a). Jelly Potentiometry, Do It Yourself. *Journal of Chemical Education*. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01198>

Sosa, G. L., Deluchi, G. E., Ramirez, S. A., & Hamer, M. (2023b). Jelly Potentiometry, Do It Yourself. *Journal of Chemical Education*, 100(6), 2373-2378.

<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01198>

Tan, S. Y., Chia, V. Y. Y., Hölttä-Otto, K., & Anariba, F. (2020). Teaching the Nernst Equation and Faradaic Current through the Use of a Designette: An Opportunity to Strengthen Key Electrochemical Concepts and Clarify Misconceptions.

Journal of Chemical Education, 97(8), 2238-2243.

<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00932>

Tan, S. Y., Hölttä-Otto, K., & Anariba, F. (2019). Development and Implementation of Design-Based Learning Opportunities for Students To Apply Electrochemical Principles in a Designette. *Journal of Chemical Education*, 96(2), 256-266.

<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00756>

Toma, H. E. (2021). Microscale Educational Kits for Learning Chemistry at Home. *Journal of Chemical Education*, 98(12), 3841-3851.

<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00637>

Varshosaz, J., Zaki, M., Minaiyan, M., & Banoozadeh, J. (2015). Preparation, Optimization, and Screening of the Effect of Processing Variables on Agar Nanospheres Loaded with Bupropion HCl by a D-Optimal Design. *BioMed Research International*,

2015, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2015/571816>

Xiang, C., Zhu, S., Song, J., Li, Y., Luo, T., Chang, C., . . . Chen, Y. (2022). Green Electrorefining of Crude Lead with High-Quality Deposits in an Additive-Assisted Methanesulfonic Acid System. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(34),

11223-11231. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02922>

Xing, Q., Yates, K., Vogt, C., Qian, Z., Frost, M. C., & Zhao, F. (2014). Increasing Mechanical Strength of Gelatin Hydrogels by Divalent Metal Ion Removal.

Scientific Reports, 4(1), 4706. <https://doi.org/10.1038/srep04706>

Yang, P., Yang, J. L., Liu, K., & Fan, H. J. (2022). Hydrogels Enable Future Smart Batteries.

ACS Nano, 16(10), 15528-15536. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c07468>

ธีรยุทธ วิไลวัลย์, สุชาติ ชินะจิตร, & จุฑามาศ ทรัพย์ประดิษฐ์. (2560). ของเสียจากห้องปฏิบัติการที่
นักเคมี (มัก) มองข้าม. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มาลัย นามวงษ์. (2561). การสร้างชุดการทดลองอย่างง่ายที่ทำจากเส้นด้ายเพื่อส่งเสริมความเข้าใจของ

นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เรื่อง เซลล์กัลวานิก มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. อุบลราชธานี.
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2563). หนังสือเรียนเพิ่มเติม เคมี เล่ม 4. โรงพิมพ์
สกสค.





ภาคผนวก

การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์



CuSO_4 , ZnSO_4
1.00 M 100 ml



80 °C เต็ม
วุ้น 1.5 g



70 °C เต็ม
คาร์ราจีแนน 1.5 g



80 °C เต็ม วุ้น 1.5 g
อุณหภูมิลดลง 70 °C เต็มคาร์ราจีแนน 1.5 g



50 °C เต็ม
เจลาติน 3 g



ใส่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 3 cm x 3 cm x 3 cm

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเจลลี่อิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ ที่ 25 °C

เจลลี่อิเล็กโทรไลต์	ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ZnACG	2.8324	2.7959	2.7520	2.7934	0.0329
	4.5092	4.4044	4.3670	4.4269	0.0602
	5.7181	5.5668	5.5089	5.5979	0.0882
	7.7432	7.4307	7.3954	7.5231	0.1563
	9.0219	8.7177	8.7625	8.8340	0.1341
	10.8052	10.4151	10.5488	10.5897	0.1618
CuACG	2.8975	2.9175	2.8695	2.8949	0.0197
	4.6397	4.5903	4.5820	4.6040	0.0255
	5.8801	5.7489	5.8188	5.8159	0.0536
	7.8997	7.7136	7.8956	7.8363	0.0868
	9.3352	9.0952	9.3480	9.2595	0.1163
	11.2141	10.9293	11.2243	11.1226	0.1368
ZnCG	2.8788	2.7819	2.8875	2.8494	0.0478
	4.5566	4.3787	4.5899	4.5084	0.0927
	5.8162	5.5056	5.8229	5.7149	0.1480
	7.8345	7.4007	7.8732	7.7028	0.2142
	9.1852	8.7115	9.3372	9.0780	0.2665
	11.0615	10.5109	11.3184	10.9636	0.3369
CuCG	2.9208	2.8174	2.8970	2.8784	0.0442
	4.6700	4.4819	4.6644	4.6054	0.0874
	5.9596	5.6946	6.0278	5.8940	0.1437
	8.0855	7.7030	8.2490	8.0125	0.2288
	9.5316	9.0729	9.8269	9.4771	0.3102
	11.4723	10.8854	11.8571	11.4049	0.3996

เจลอิเล็กโทรไลต์	ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ZnGel	3.0397	3.0392	3.0103	3.0298	0.0137
	4.8437	4.8546	4.8300	4.8428	0.0101
	6.1926	6.1693	6.1756	6.1792	0.0099
	8.3417	8.3661	8.4226	8.3768	0.0339
	9.8810	9.8977	10.0053	9.9280	0.0551
	11.9356	11.9527	12.0298	11.9727	0.0410
CuGel	3.2597	3.2856	3.3314	3.2922	0.0296
	5.1759	5.1817	5.2721	5.2099	0.0440
	6.7158	6.6823	6.8693	6.7558	0.0814
	9.0505	9.0063	9.4819	9.1796	0.2145
	10.7083	10.6204	11.3268	10.8852	0.3144
	12.8674	12.7538	13.6471	13.0895	0.3970

ตอนที่ 2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกของเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ เข้มข้น 1.00 M ที่ 25 °C

เวลา (นาที)	Agar+CG	Carrageenan	Gelatin	Solution
0	1.076	1.093	1.095	1.096
10	1.037	1.06	1.065	1.090
20	1.03	1.054	1.06	1.090
30	1.025	1.049	1.057	1.092
40	1.019	1.045	1.053	1.092
50	1.016	1.042	1.049	1.093
60	1.01	1.039	1.046	1.092
70	0.993	1.017	1.019	1.092
80	0.992	1.015	1.016	1.092
90	0.991	1.013	1.013	1.092
100	0.992	1.007	1.006	1.093
110	0.991	1.009	0.997	1.092

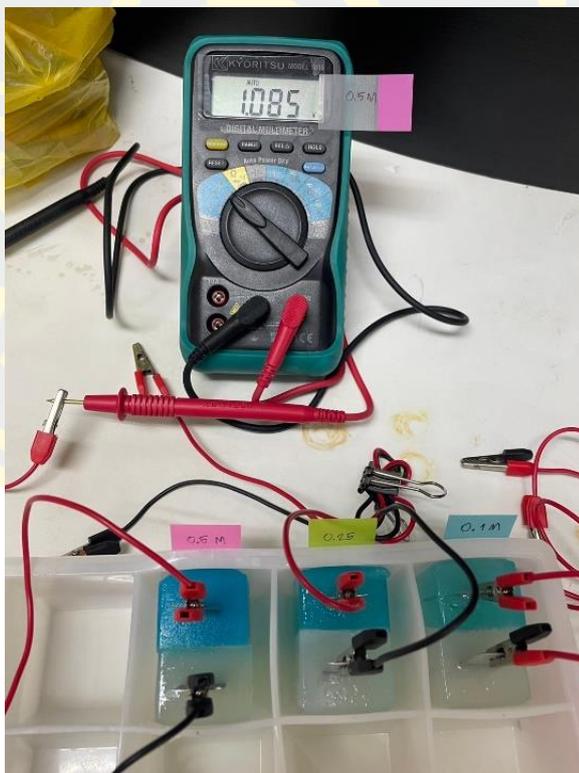
เวลา (นาที)	Agar+CG	Carrageenan	Gelatin	Solution
120	0.991	1.008	0.995	1.092
130	0.990	1.007	0.992	1.093
140	0.990	1.005	0.982	1.093
150	0.988	1.006	0.981	1.093
160	0.987	1.004	0.983	1.094
170	0.985	1.003	0.980	1.094
180	0.983	1.001	0.978	1.095
190	0.983	1.001	0.975	1.094
200	0.982	0.999	0.974	1.094
210	0.982	1.002	0.972	1.094
220	0.982	0.999	0.972	1.094
230	0.983	0.999	0.971	1.095
240	0.984	0.998	0.970	1.095
250	0.981	0.997	0.970	1.095
260	0.981	0.998	0.969	1.094
270	0.980	0.996	0.968	1.094
280	0.975	0.994	0.965	1.094
290	0.973	0.993	0.963	1.095
300	0.973	0.991	0.962	1.095
310	0.973	0.990	0.960	1.095
320	0.971	0.990	0.959	1.095
330	0.972	0.988	0.956	1.094
340	0.971	0.988	0.951	1.094
350	0.980	0.988	0.949	1.091
360	0.974	0.988	0.949	1.091

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ CuSO_4 และ ZnSO_4 ที่ใช้เตรียมเซลล์กัลวานิก ประเภทเซลล์เล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อความคงทนของค่าศักย์ไฟฟ้า

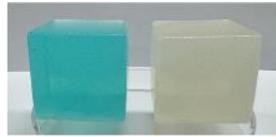
1. ค่าศักย์ไฟฟ้าและ %Relative error

เวลา	0.10 M	%Relative error	0.25 M	%Relative error	0.50 M	%Relative error	1.00 M	%Relative error
0	1.079	1.909	1.081	1.727	1.089	1.030	1.092	0.697
60	1.054	4.182	1.059	3.727	1.063	3.333	1.070	2.697
120	1.024	6.879	1.035	5.909	1.038	5.606	1.048	4.727
180	1.003	8.848	1.015	7.773	1.019	7.333	1.025	6.788
240	0.988	10.212	1.003	8.788	1.008	8.394	1.014	7.848
300	0.972	11.636	0.980	10.909	0.998	9.303	1.002	8.909
360	0.948	13.848	0.964	12.364	0.978	11.061	0.987	10.273

2. การจัดอุปกรณ์วัดค่าศักย์ไฟฟ้า



ตอนที่ 4 การสร้างแบตเตอรี่จากเกลือเล็กโทรไลต์และทดสอบสมบัติความคงทนต่อค่าศักย์ไฟฟ้า
วิธีการทดลอง



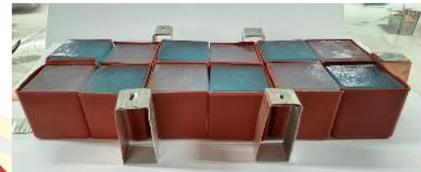
$\text{CuSO}_4, \text{ZnSO}_4$ 0.10 M
จากคาร์ราจีแนน



บล็อกของเกลือเล็กโทรไลต์
จำนวน 1 เซลล์



ขั้วโลหะสังกะสีและทองแดง
ที่เย็บติดกันด้วยคีมย้ำโลหะ



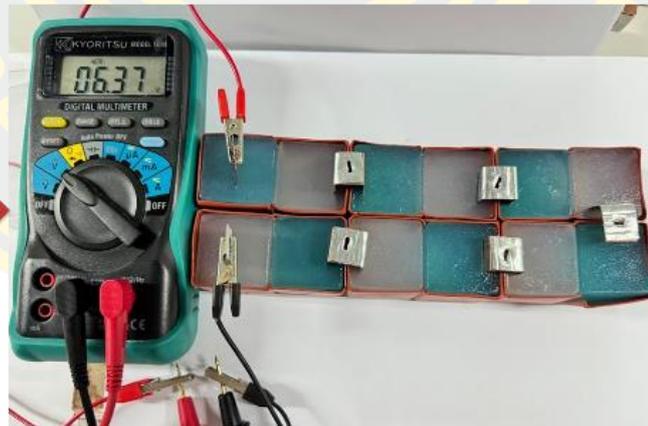
ขั้วโลหะที่เย็บติดกันสำหรับเชื่อมเซลล์



วางบล็อกเซลล์ต่อกันทั้งหมด 6 เซลล์
โดยแต่ละเซลล์เจลไม่สัมผัสกัน



วงจรอนุกรมของแบตเตอรี่เจล 6 เซลล์



ชั่งน้ำหนักทุก ๆ 30 นาที และบันทึกผลค่าศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ
10 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 360 นาที

ตอนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพการชุบโลหะโดยใช้แบตเตอรี่จากเจลลีเล็กโทรไลต์เทียบกับ
แบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย

วิธีการทดลอง



ตะปูเหล็กยาว 5 cm



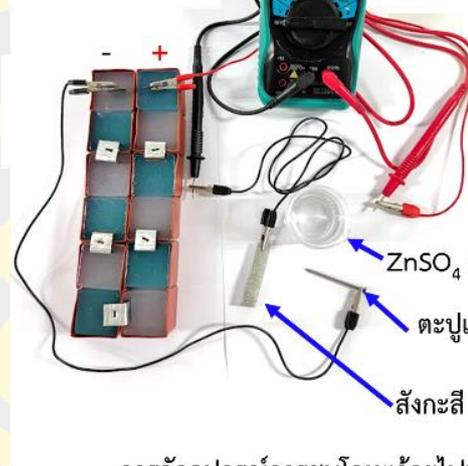
สังกะสีขนาด 1.5x5 cm

ขัดด้วยกระดาษทราย

ชั่งน้ำหนักก่อนการทดลอง



ถ่านไฟฉาย 1.5 V 4 ก้อน

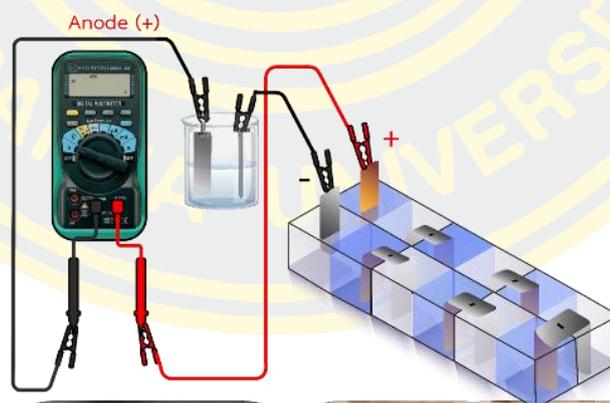


ZnSO₄ 0.10 M, 20 ml

ตะปูเหล็ก (-)

สังกะสี (+)

การจัดอุปกรณ์การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

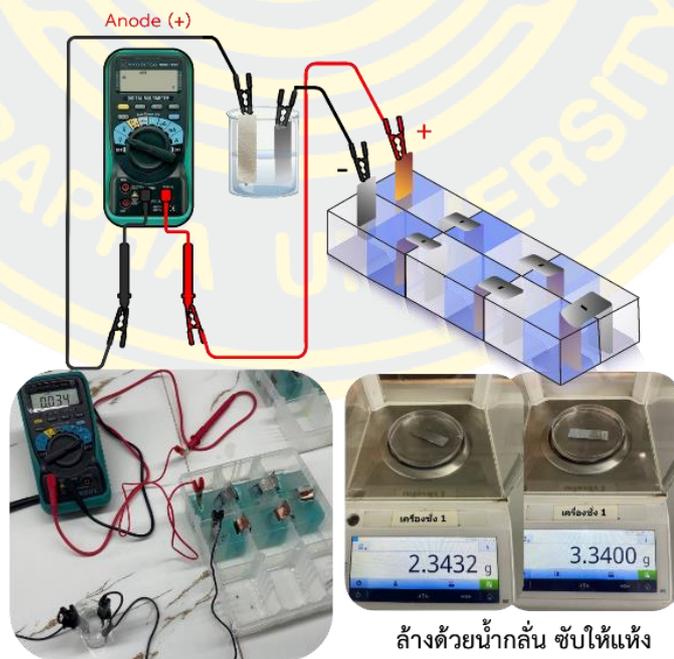


ล้างด้วยน้ำกลั่น ซับให้แห้ง

ชั่งน้ำหนักหลังการทดลอง

ตอนที่ 6 การศึกษาประสิทธิภาพการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่จาก
เจลลีเล็กโทรไลต์เทียบกับแบตเตอรี่จากถ่านไฟฉาย

วิธีการทดลอง



ล้างด้วยน้ำกลั่น ซับให้แห้ง
ชั่งน้ำหนักหลังการทดลอง

ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นถ่านไฟฉาย

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวสุจิตตรา เจนงาน
วัน เดือน ปี เกิด 20 พฤษภาคม 2534
สถานที่เกิด ตรัง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 137 ถนนนิคมลำตะคอง ตำบลหนองสาหร่าย อำเภอปากช่อง จังหวัด
นครราชสีมา
ประวัติการศึกษา การศึกษาระดับบัณฑิต วิชาเอกวิทยาศาสตร์-เคมี มหาวิทยาลัยทักษิณ

