ผลของพอลิแอสพาร์เทตในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม

นางสาวผกามาส ทันดอน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF POLYASPARTATE IN GELLED ELECTROLYTE ON PERFORMANCE OF VALVE-REGULATED LEAD-ACID BATTERIES

Miss Phakamas Tundorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของพอลิแอสพาร์เทตในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม
โดย	นางสาวผกามาส ทันดอน
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

……... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ)

…… กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

…… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. วีณา เสียงเพราะ)

ผกามาส ทันดอน: ผลของพอลิแอสพาร์เทตในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม. (EFFECTS OF POLYASPARTATE IN GELLED ELECTROLYTE ON PERFORMANCE OF VALVE-REGULATED LEAD-ACID BATTERIES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ, 150 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจล คือ ปริมาณฟูมซิลิกา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณพอลิแอสพาร์เทต จากนั้นทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่โดยใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบเจลอิเล็กโทรไลต์ พบว่าการเพิ่มปริมาณฟูมซิลิกาหรืออัตราเร็วในการกวน ส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลงและความแข็งของเจลมากขึ้น ในขณะที่การเติมพอลิแอสพาร์เทตในเจลอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ระยะเวลาการเกิดเจลนานขึ้นและความแข็งของเจลน้อยลง ผลการวิเคราะห์เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าการเติมฟูมซิลิกาลงในอิเล็กโทรไลต์และการเพิ่มอัตราเร็วในการกวน ไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาหลักภายในของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แต่ช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจน และการเติมพอลิแอสพาร์เทตจะสามารถช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจนได้มากขึ้น ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด (100% Depth of Discharge, DoD) พบว่าเจลแบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุสูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว โดยเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที และพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ให้ค่าความจุในการคายประจุสูงที่สุด ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน จึงเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต ผลการทดสอบพบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีสมรรถนะการใช้งานที่ดีที่สุดในทุกๆ ภาวะการใช้งานที่ศึกษา โดยมีอัตราการคายประจุด้วยตัวเองน้อยกว่า มีอายุการใช้งานนานกว่า มีสมรรถนะในการคายประจุภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วปกติและอัตราเร็วสูงดีกว่า และมีสมรรถนะในการคายประจุที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆ สูงกว่า โดยผลการทดสอบสมบัติของแผ่นขั้วลบด้วยเทคนิค XRD และ SEM พบว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทต ลงไปในแบตเตอรี่ ไม่ส่งผลให้เกิดสารประกอบอื่นที่แผ่นขั้ว แต่ส่งผลให้ผลึกของตะกั่วซัลเฟตมีขนาดเล็ก ซึ่งจะไม่บดบังพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาของแผ่นขั้ว และส่งผลให้แบตเตอรี่มีสมรรถนะในการคายประจุที่ดีขึ้น

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554 .....

5372290123: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORDS: GEL ELECTROLYTE / LEAD- ACID BATTERY / FUME SILICA

PHAKAMAS TUNDORN: EFFECTS OF POLYASPARTATE IN GELLED ELECTROLYTE ON PERFORMANCE OF VALVE-REGULATED LEAD-ACID BATTERIES. ADVISOR: ASST. PROF. NISIT TANTAVICHET, PH.D., 150 pp.

This thesis studied the effects of polyaspartate in gelled electrolyte on performance of valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries. First, the conditions for preparing the gel electrolyte such as the amount of fumed silica, stirring rate and amount of polyaspartate were investigated. Then, several electrolyte formulations were selected to fill in VRLA batteries and the VRLA batteries were tested under different application conditions. The results showed that by increasing the fumed silica content or stirring rate, the gelling time were shorten and the gel strength were increase, while an addition of polyaspartate into gel electrolytes was found to increase the gelling time and reduce the gel strength. The cyclic voltammetry results indicated that the addition of fumed silica into electrolyte and the increasing of the stirring rate should have no effect on the main reactions in lead-acid battery operation but could reduce the hydrogen oxygen evolution reaction rate, and by adding more polyaspartate would also reduce the rate. The batteries performances were tested under 100% depth of discharge condition and the results showed that the gel batteries had higher discharge capacity than the non-gel batteries. The gel batteries prepared from 4% w/v fumed silica and 0.005% w/v polyaspartate at 2,000 stirring rate provided the highest discharge capacity which is the best condition in this study. Thus, the investigations of battery performances on different applications were compared among the non-gel battery and the gel batteries both with and without polyaspartate. The results indicated that the gel battery with polyaspartate yielded the best performance on every application studied. It had lower self-discharge rate, longer cycle life, higher discharge performance under partial-state-of-charge condition at both normal rate and high rate and higher discharge performance at different temperature operation. The properties of negative plates were investigated by XRD and SEM and found that the addition of polyaspartate had no sign of the presence the other additional compounds on the negative plates but reduced the size of lead sulfate crystals. The reduced lead sulfate crystal sizes leaded to the higher reaction area of electrodes which improved the battery overall performance.

Department : Chemical Technology Student's Signature .....
Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature .....
Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิสิต ตัณฑวิเชฐ ภาควิชาเคมีเทคนิค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำด้านวิชาการและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร และอาจารย์ ดร. วีณา เสียงเพราะ ที่กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณ์ วัฒกียานนท์ และพนักงานห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่ ที่ให้ข้อมูลและอำนวยความสะดวกด้านสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบแบตเตอรี่

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติ ด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อรวรรณ ชัยลภากุล ภาควิชาเคมี คุณฐิติพร ตันติชนะกุล รุ่นพี่ปริญญาโทภาควิชาเคมีเทคนิค และคุณปรียาภรณ์ สง่ารัตนพิมาน รุ่นพี่ปริญญาโทภาควิชาเคมี ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและภาควิชาเคมีที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบคุณพระคุณบิดา มารดา และพี่ ผู้อยู่เบื้องหลังที่เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นแรงผลักดันจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 แบตเตอรี่..... 6

2.1.1 ประวัติของแบตเตอรี่..... 6

2.1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่..... 7

2.1.3 ประเภทของแบตเตอรี่..... 9

2.2 ความหมายของตัวแปร คำจำกัดความ และสมรรถนะของแบตเตอรี่..... 9

2.1.1 กระแสไฟฟ้า 10

2.2.2 ความต่างศักย์..... 10

2.2.3 ความจุของแบตเตอรี่..... 11

2.2.4 การอัดและการคายประจุ..... 12

2.2.5 อัตราการอัดประจุและอัตราการคายประจุ..... 14

2.2.6 ความลึกของการคายประจุ..... 15

2.2.7 อัตราการคายประจุด้วยตัวเอง..... 17

หน้า

2.2.8 การประจุไฟฟ้ามากเกิน..... 18
2.2.9 วงจรอายุ..... 19
2.2.10 ประสิทธิภาพ..... 20
2.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด 20
2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด..... 21
2.3.2 ประเภทของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด..... 23
2.3.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด..... 27
2.3.4 ขอบเขตการใช้งานและความล้มเหลวในแบตเตอรี่..... 35
2.4 เจลอิเล็กโทรไลต์..... 37
2.4.1 ผลของค่า pH..... 39
2.4.2 ผลของชนิดและความเข้มข้นของเกลือ..... 40
2.4.3 ผลของชนิด ปริมาณและขนาดอนุภาคของซิลิกา..... 40
2.5 สารเติมแต่งที่ใช้ในเจลอิเล็กโทรไลต์..... 42
2.5.1 โซเดียมซัลเฟต..... 42
2.5.2 พอลิแอสพาร์เทต..... 43
2.6 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า..... 44
2.6.1 หลักการของโวลแทมเมทรี..... 45
2.6.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำโวลแทมเมทรี..... 46
2.6.3 เทคนิควิเคราะห์ที่สำคัญในกลุ่มโวลแทมเมทรี..... 46
2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดช่องกราด..... 49
2.8 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... 50
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 52
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 56
3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 56
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย..... 56
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 56
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... 58
3.2 การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์..... 58

หน้า

3.3 การทดสอบสมบัติของอิเล็กโทรไลต์……..……... 58
3.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเจลอิเล็กโทรไลต์……..... 59
3.3.2 การทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค
ไซคลิกโวลแทมเมทรี……..... 60
3.4 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่……..……..….. 65
3.4.1 การทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง
12 โวลต์..... 65
3.4.2 การทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง
12 โวลต์..... 67
3.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแผ่นขั้วลบ……..…… 72
3.5.1 การเตรียมแผ่นขั้วลบ..... 72
3.5.2 วิธีการทดสอบสมบัติของแผ่นขั้วลบ……..……. 73
บทที่ 4 ผลการทดลองและเคราะห์ผลการทดลอง..... 74
4.1 การศึกษาผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทต..…….. 74
4.1.1 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี…….. 75
4.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่..... 78
4.2 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์..... 80
4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์..... 80
4.2.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่……..... 95
4.3 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ในภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน..... 105
4.3.1 การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่……..... 105
4.3.2 การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่……..……..... 108
4.3.3 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม..... 109
4.3.4 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม
ที่อัตราการคายประจุสูงแบบกระแสคงที่…….. 111
4.3.5 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิการใช้งานที่แตกต่างกัน..... 114
4.4 การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบหลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่……. 117
4.4.1 การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์……. 117

หน้า

4.4.2 การศึกษาสมบัติทางสัณฐานของแผ่นขั้วลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด…… 122
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ…….... 129
5.1 สรุปผลการทดลอง……..... 129
5.2 ข้อเสนอแนะ……..... 132
รายการอ้างอิง…….. 133
ภาคผนวก……..... 138
ภาคผนวก ก การคำนวณ…..……..... 139
ภาคผนวก ข กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรี……..... 141
ภาคผนวก ค สมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบและที่ใช้ทางการค้า……..... 144
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์…….... 150

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ของค่าดีโอดีและค่าเอสโอซี……	15
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเอสโอซีกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์…….....	16
2.3	ตัวอย่างของจำนวนรอบอายุการใช้งานกับความลึกในการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วแบบควบคุมที่ใช้ในรถยนต์…….....	19
2.4	ค่าพารามิเตอร์ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น (kg/L) ความเข้มข้นในหน่วย mol/L และ mol/kg H_2O ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบวกและลบเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน.....	32
2.5	ผลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อโครงสร้างเจล…….....	41
2.6	เทคนิควิธีการทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า……..…….....	45
3.1	ภาวะของอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี….....	62
3.2	ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) และอัตราการคายประจุสูง(1C).....	67
3.3	ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) และอัตราการคายประจุสูง(1C).....	68
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่……..	69
3.5	ขั้นตอนการทดสอบการคายสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) หลังการคายประจุด้วยตัว เอง.....	69
3.6	ขั้นตอนการทดสอบอายุการใช้งานสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุสูง (1C) …….....	70
3.7	ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วปกติ …….....	71

ตารางที่ หน้า

3.8 ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูงแบบกระแสคงที่..... 71
3.9 ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 72
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวนต่อระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจล..... 83
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาพอลิแอสพาร์เทตและอัตราเร็วในการกวนต่อระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจล..... 86

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของเซลล์โวลตาอิก.....	7
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการคายประจุ จุดตัดของค่าความต่างศักย์ที่อัตราเร็วในกายคายประจุต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด.....	12
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage.....	13
2.4	ลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 100 แอมแปร์-ชั่วโมงขณะเกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ.....	14
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วแบบควบคุมกับระยะเวลาในการเก็บที่อุณหภูมิต่างๆ.....	18
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบอายุการใช้งานกับความลึกในการคายประ จุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วแบบควบคุม.....	19
2.7	ส่วนประกอบต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด	21
2.8	มวลองค์ประกอบของแบตเตอรี่แบบเปียกเทียบกับแบตเตอรี่แบบเจล.....	25
2.9	ปฏิกิริยาการคายและการอัดประจุภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ก) ปฏิกิริยาการคายประจุไฟฟ้า ข) ปฏิกิริยาการอัดประจุไฟฟ้า.....	29
2.10	ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความถ่วงจำเพาะของเซลล์ตะกั่ว-กรดที่อัตราการคายประจุและอัตราการอัดประจุคงที่.....	30
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดกับค่าความหนาแน่นของกรดและค่าความเข้มข้นของกรด	32
2.12	การนำไฟฟ้าของสารละลายกรดซัลฟิวริก.....	34
2.13	การจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคของซิลิกา.....	38
2.14	การสร้างโครงสร้างของเจลและการผันกลับของโครงสร้างเจลด้วยพันธะไซโลเซน.....	38
2.15	ขั้นตอนการสร้างเจล.....	39
2.16	การสังเคราะห์พอลิแอสพาร์เทต.....	43
2.17	โพลาโรกราฟีแบบเส้นตรง.....	47
2.18	สัญญาณความต่างศักย์ที่ให้กับไซคลิกโวลแทมเมทรี.....	48

ภาพที่		หน้า
2.19	ไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	48
2.20	สัญญาณแอมแปโรเมทรี.....	49
2.21	หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	50
2.22	หลักการของเครื่อง X-ray diffraction.....	51
3.1	อุปกรณ์การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ก) ภาชนะสำหรับเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ และ ข) เครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้.....	57
3.2	อุปกรณ์ทดสอบและลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจล……..……..	60
3.3	Potentionstat/Galvanostat ทดสอบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว…….....	61
3.4	เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTA30 ของบริษัท AUTOLAB.....	64
3.5	หน้าต่างโปรแกรม GPES ของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat……	64
3.6	เครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 ……..	66
3.7	ลักษณะของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม ก) ลักษณะแผ่นขั้วลบก่อนตัด ข) ลักษณะแผ่นขั้วลบหลังตัด.....	73
4.1	กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เปรียบเทียบกรดซัลฟิวริกที่เติมสารเติมแต่งและไม่เติมสารเติมแต่ง ช่วง ก) -2.5 V ถึง 3.0 V ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก.....	77
4.2	สมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง แบต เตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร และแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร และพอลิแอสพาร์เทตร้อยละ 0.005 โดยมวล ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราการเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง.....	79

ภาพที่		หน้า
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกาต่างๆ ก) อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที ข) อัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที.....	82
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณพอลิแอสพาร์เทตต่างๆ ก) อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที ข) อัตราเร็ว4,000 รอบต่อนาที.....	85
4.5	กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตรา เร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก.....	88
4.6	กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตรา เร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก.....	89
4.7	กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก.....	90
4.8	กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทต ปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก.....	93
4.9	กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทต ปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก.....	94

ภาพที่ หน้า

4.10 ค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นที่อัตราเร็วการคายประจุ 10 และ 1 ชั่วโมงเปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ก) อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที ข) 4,000 รอบต่อนาที..... 96

4.11 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยใช้อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง……..……..…… 99

4.12 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยใช้อัตราการกวน 4,000 รอบต่อนาที ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง..... 100

4.13 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v เปรียบเทียบอัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง..... 101

4.14 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ภายใต้ภาวะการคายประจุ หมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง…..... 104

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่าความจุประจุของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ กับระยะเวลาในการเก็บเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต..... 107

4.16 สมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังจากเก็บแบตเตอรี่เป็นเวลา 3 เดือน เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวและเจลแบตเตอรี่เติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต……..…… 107

ภาพที่ หน้า

4.17 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุกับจำนวนรอบอายุการใช้งาน จำนวน 200 รอบ ของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)..... 109

4.18 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุกับจำนวนรอบการทด สอบจำนวน 36 รอบ ของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ภาย ใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และมีภาวการณ์อัดประจุไม่เต็ม..... 111

4.19 ค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุกับจำนวนรอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวการณ์อัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง (30 นาที) แบบกระแสคงที่..... 113

4.20 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุกับจำนวนรอบการทด สอบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) อุณหภูมิการดำเนินงาน 0- 50 °C ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต..... 115

4.21 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุในรอบที่ 6 ของแบต เตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ กับอุณหภูมิการดำเนินงาน 0 – 50° C..... 116

4.22 รูปแบบ XRD ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะในการคายประจุภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) จำนวน 15 รอบ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ..... 118

ภาพที่		หน้า
4.23	รูปแบบ XRD ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) จำนวน 200 รอบ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ……..	120
4.24	รูปแบบ XRD ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวการณ์อัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูง (30 นาที) เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ…….	121
4.25	รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะในการคายประจุภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) จำนวน 15 รอบ ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ง) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v……..	123
4.26	รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) จำนวน 200 รอบ ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v…….……	125
4.27	รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วปกติ (10 ชั่วโมง) จำนวน 36 รอบ ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v……...	127
4.28	รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูง (30 นาที) ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v……	128

ภาพที่ หน้า

ข.1 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.1) เปรียบเทียบกรดซัลฟิวริกที่เติมสารเติมแต่งและไม่เติมสารเติมแต่ง..... 141
ข.2 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.5) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที..... 141
ข.3 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.6) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที..... 142
ข.4 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.7) เปรียบเทียบฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที..... 142
ข.5 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.8) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที..... 143
ข.6 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.9) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที..... 143
ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท Kung Long Batteries Industrial..... 144
ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท MK battery..... 144
ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท Narada Power Source..... 145
ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท MASTERVOLT..... 145

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งความต้องการบริโภคพลังงานมีมากขึ้นทั้งในส่วนครัวเรือนและส่วนภาคอุตสาหกรรม โดยพลังงานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานแบบสิ้นเปลือง เช่น พลังงานจากถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งการเผาไม้พลังงานประเภทนี้ก่อให้เกิดมลพิษสูง และมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต และพลังงานอีกประเภทหนึ่ง คือ พลังงานแบบหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น ซึ่งพลังงานประเภทนี้เป็นพลังงานบริสุทธิ์ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ จึงเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่จะมาทดแทนพลังงานประเภทแรก ซึ่งรูปแบบของพลังงานที่มีความต้องการใช้สูงและมีการใช้งานที่สะดวกคือ พลังงานไฟฟ้า โดยผลิตจากการใช้พลังงานที่กล่าวมาข้างต้น เช่น โรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานน้ำ เป็นต้น โดยพลังงานไฟฟ้าจะถูกแจกจ่ายไปยังผู้ใช้งาน ซึ่งสามารถใช้งานได้โดยตรงโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเข้ากับปลั๊ก แต่บางกรณีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเข้ากับปลั๊กทำได้ไม่สะดวก และความต้องการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้เป็นสิ่งจำเป็น จึงมีการคิดค้นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าขึ้น ซึ่งเรียกว่า แบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ทางเคมีไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ รวมถึงการสตาร์ตและขับเคลื่อนยานพาหนะ ซึ่งแบตเตอรี่แบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (primary battery หรือ disposable battery) และแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary battery หรือ Rechargeable battery) โดยแบตเตอรี่ปฐมภูมิ หมายถึง แบตเตอรี่ที่ใช้งานได้เพียงครั้งเดียว ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพื่อแปลงพลังงานเคมีเป็นกระแสไฟฟ้าไม่สามารถผันกลับได้ เมื่อประจุไฟฟ้าหมดจะต้องทิ้งแบตเตอรี่ไป ไม่สามารถประจุไฟฟ้าเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวอย่างแบตเตอรี่ปฐมภูมิ เช่น อัลคาไลน์แบตเตอรี่ (Alkaline battery) และ ลิเทียมแบตเตอรี่ (Lithium battery) และแบตเตอรี่ทุติยภูมิ หมายถึง แบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ได้ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

สามารถเกิดย้อนกลับได้ ตัวอย่างแบตเตอรี่ทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery) แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบพอลิเมอร์ แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-cadmium battery) และแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery) ซึ่งทำให้แบตเตอรี่ทุติยภูมิสามารถอัดประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ (recharge) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery) เป็นหนึ่งในแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่มีอัตราการผลิต และความต้องการสูง มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ทำให้มีอัตราส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ได้ต่อมวลต่ำกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น แต่แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด มีราคาถูก เป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูง ที่ให้กระแสได้มาก ต้นทุนในการเก็บพลังงานถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น [1] โดยนิยมใช้ในการสตาร์ตและขับเคลื่อนรถยนต์และยานพาหนะอื่นๆ รวมถึงเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในอุปกรณ์สำรองไฟ และระบบไฟฉุกเฉิน โดยทั่วไปแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมักอยู่ในสถานะของเหลว เรียกแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบนี้ว่า Flood lead-acid battery ซึ่งมักเกิดปัญหาการรั่วซึมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และการสูญเสียน้ำในขั้นตอนการประจุไฟฟ้าทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาโดยการเติมน้ำกลั่นอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของกรดในแบตเตอรี่และไม่ให้ขั้วไฟฟ้าถูกกัดกร่อนซึ่งเป็นสาเหตุให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ต่ำลง และทำให้มีอายุการใช้งานสั้นลง [2] และอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่สั้นลง คือการสะสมของตะกั่วซัลเฟตบนแผ่นขั้วลบ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แผ่นขั้วลบ หากตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นมีผลึกขนาดใหญ่ จะเกิดการสะสมของตะกั่วซัลเฟตบนแผ่นขั้วลบ ซึ่งจะไปปิดกั้นพื้นที่เกิดปฏิกิริยาที่แผ่นขั้ว ทำให้ประสิทธิภาพการประจุไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลง [3]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม (Valve-Regulated lead acid battery, VRLA) ซึ่งแบ่งเป็น *2* ชนิด คือ เทคโนโลยีแผ่นดูดซึมใยแก้ว (Absorbent glass mat, AGM) โดยกรดซัลฟิวริกจะถูกดูดซึมบนแผ่นกั้นใยแก้ว และเทคโนโลยีเจลอิเล็กโทรไลต์ (Gelled electrolyte) โดยกรดซัลฟิวริกจะถูกตรึงด้วยซิลิกาให้อยู่ในรูปของซิลิกาเจล ซึ่งเป็นสถานะที่ยากต่อการเคลื่อนไหว ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาการรั่วซึมของกรดและลดปัญหาการสูญเสียน้ำได้ [4] งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่มีแผ่นกั้นเป็นแผ่นดูดซึมใยแก้ว และศึกษาผลของสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต ซึ่งสามารถช่วยควบคุมกระบวนการเกิดผลึกของตะกั่วซัลเฟต ให้มีผลึกขนาดเล็กลง และช่วยลดปัญหาการสะสมของตะกั่วซัลเฟตบนแผ่นขั้วลบ [5] ซึ่งคาดว่าน่าจะช่วยเพิ่มค่าความจุประจุและจำนวนรอบอายุการใช้

งานของแบตเตอรีให้สูงขึ้น โดยในต่างประเทศแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น แต่ในประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตแบตเตอรี่ชนิดเจลได้ ทำให้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการผลิตและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดเจลให้เกิดขึ้นภายในประเทศ เพื่อลดการนำเข้าและเป็นองค์ความรู้ใหม่ของประเทศจึงควรค่าแก่การศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์

1. ประยุกต์ใช้สารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตเพื่อใช้ในเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม
2. ศึกษาผลของพอลิแอสพาร์เทตต่อกระบวนการเกิดเจลและสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของเจล
3. ทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมโดยใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม โดยศึกษาผลของปริมาณฟูมซิลิกา อัตราเร็วในการกวนเจล และผลของการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต โดยศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ต่อสมบัติทางกายภาพของเจล เช่น เวลาการเกิดเจล และความแข็งของเจล นอกจากนั้นยังศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry,CV) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจล จากนั้นจะนำเจลอิเล็กโทรไลต์ไปบรรจุลงในเซลล์แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ โดยศึกษาที่ภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น ความสามารถในการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำและสูง (low-rate and hight-rate discharge) ความสามารถในการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วต่างๆ (patial state-of-charge) การคายประจุด้วยตัวเอง (self-discharge) รวมถึงศึกษาจำนวนรอบอายุการใช้งาน (cycle life) และผลของอุณหภูมิการทำงานของแบตเตอรี่ เป็นต้น จากนั้นจะทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแผ่นขั้วแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมหลังการใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ผลของการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตที่มีต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมที่มีการพัฒนาประสิทธิภาพดีขึ้น
2. เป็นแนวทางพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด การพัฒนาอิเล็กโทรไลต์ในสภาพของเหลวและเจลในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด รวมทั้งงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. วางแผนการทดลอง เตรียมอุปกรณ์ และศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่
3. ค้นคว้าและทดลองสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เพื่อบรรจุลงในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม เช่น
   - ปริมาณ gelling agent (ฟูมซิลิกา) ที่เหมาะสม
   - ปริมาณของสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตที่เหมาะสม
   - ความเร็วในการกวนเจลที่เหมาะสม
4. ทดสอบสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น เช่น
   - เวลาในการเกิดเจล (gelling time)
   - ความแข็งของเจล (gel strength)
   - ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารวมตัวของออกซิเจน และปฏิกิริยาพื้นฐานในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (cyclic voltammetry)
5. ทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมที่บรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นในภาวะการใช้งานต่างๆ เช่น
   - ความสามารถในการคายประจุที่อัตราเร็วต่างๆ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด (100 % depth of discharge, 100%DOD)
   - การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Cycle life)
   - ความสามารถในการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วต่างๆ (patial state-of-charge)
   - การคายประจุเอง (self discharge)

- ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ

6. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแผ่นขั้วแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมหลังการใช้งาน
7. วิเคราะห์ สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบตเตอรี่ (Battery)

2.1.1 ประวัติของแบตเตอรี่ [6]

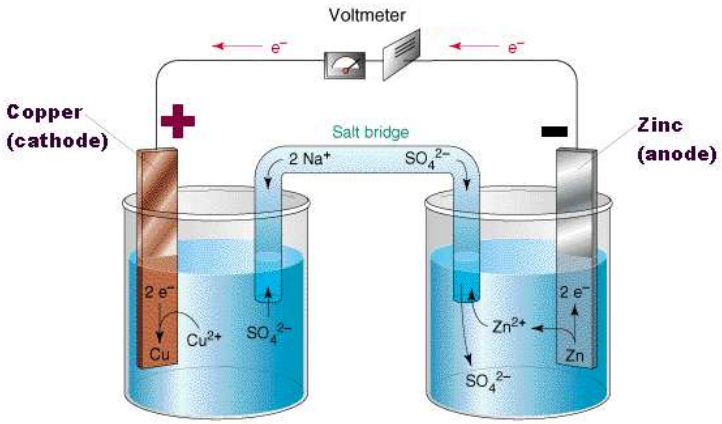
จุดเริ่มต้นของการค้นพบแบตเตอรี่ เริ่มจากการค้นพบเซลล์กัลวานิก (Galvanic cells) ในปี ค.ศ. 1789 โดยนักชีววิทยาชาวอิตาลีชื่อ ลุยจิ กัลวานี (Luigi Galvani) ซึ่งเป็นการค้นพบโดยบังเอิญขณะสอนวิชากายวิภาคศาสตร์ของกบ เมื่อกัลวานีใช้ปากคีมโลหะแตะที่ขาของกบคู่หนึ่งที่วางอยู่บนจานโลหะ เพื่ออธิบายเกี่ยวกับระบบประสาทและกล้ามเนื้อ ปรากฏว่าขากบสามารถกระตุกได้เอง จากนั้นกัลวานีจึงทำการทดลองซ้ำอีกหลายครั้ง ผลการทดลองก็ออกมาเหมือนกันทุกครั้ง กัลวานีจึงสรุปว่า กบมีกระแสไฟฟ้าอยู่ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นเมื่อใช้คีมแตะที่กบ เพราะคีมทำจากเหล็กซึ่งเป็นสื่อไฟฟ้า จากการค้นพบของกัลวานี อเลซซานโดร โวลตา (Alessandro Volta) นักฟิสิกส์ชาวอิตาลี ได้สนใจทำการทดลองต่ออย่างจริงจังโดยได้ทำการทดลองกับลิ้นของมนุษย์ โดยวางเหรียญเงินไว้บนลิ้น และวางเหรียญทองแดงไว้ใต้ลิ้น ปรากฏว่าลิ้นกระตุก จากผลการทดลองนี้ โวลตาพบว่าการที่ขากบกระตุกนั้นไม่ได้เกิดจากการที่กบมีกระแสไฟฟ้า แต่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของโลหะต่างชนิดกันที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกรดเกลือซึ่งมีอยู่ในสัตว์รวมถึงมนุษย์ด้วย

ในปี ค.ศ. 1792 โวลตาได้นำหลักการนี้มาประดิษฐ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชื่อว่า โวลตาอิกไพล์ (Voltaic Pile) หรือ แบตเตอรี่ (Battery) ซึ่งถือได้ว่าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแรกของโลกที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยแบตเตอรี่ของโวลตาใช้แผ่นทองแดงวางเป็นแผ่นแรก ต่อเข้ากับกระดาษที่ชุบด้วยกรดเหลือหรือกรดกำมะถัน แล้วต่อด้วยแผ่นสังกะสี และกระดาษที่ชุบกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน ซ้อนสลับกันไปเรื่อยๆ ประมาณ 100 แผ่น จนถึงแผ่นสังกะสีเป็นแผ่นสุดท้าย จากนั้นใช้ลวดหนึ่งเส้น โดยปลายข้างหนึ่งต่อเข้ากับแผนทองแดงแผ่นแรก ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งต่อเข้ากับแผ่นสังกะสีแผ่นสุดท้าย ซึ่งจะทำให้ลวดเส้นนี้มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ตลอด ต่อจากนั้นโวลตาได้ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับโวลตาอิกไพล์ต่อไป จนพบว่ายิ่งใช้แผ่นโลหะมากแผ่นขึ้นเท่าไรก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้นตามลำดับและได้นำหลักการดังกล่าวมาสร้างเครื่อง โวลตาอิกเซลล์ (Voltaic Cell) โดยใช้โวลตาอิกไพล์หลาย ๆ อันมาต่อกันแบบอนุกรมซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้ได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

ในปีค.ศ. 1890 ได้มีการค้นพบว่าการเกิดกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้านั้น จะต้องมีส่วนสำคัญด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนของอิเล็กโทรดที่ต่างชนิดกันเพื่อให้มีค่าความต่างศักย์ที่ต่างกันของ 2 ขั้วไฟฟ้าสำหรับนำอิเล็กตรอน และส่วนของอิเล็กโทรไลต์ที่นำไอออน และใน ค.ศ. 1803 ริตเตอร์ (Ritter) ได้ทำการทดสอบทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งทดสอบโดยใช้อิเล็กโทรดที่เหมือนกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ขั้วทองแดงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าเมื่อตัดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดการทดลอง พบว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้าม ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของเซลล์ทุติยภูมิ หรือการเก็บพลังงานในแบตเตอรี่

2.1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่หรือเซลล์โวลตาอิก (Voltaic Cell) ประกอบด้วยสองครึ่งเซลล์ที่เชื่อมต่อกันด้วยสะพานเกลือซึ่งเป็นตัวกั้นระหว่างเซลล์ และทำหน้าที่ส่งผ่านอิออนเท่านั้น โดยไม่ยอมให้โมเลกุลของน้ำผ่าน รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบในเซลล์โวลตาอิก



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเซลล์โวลตาอิก [7]

แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์โวลตาอิกหนึ่งเซลล์หรือมากกว่า โดยแต่ละเซลล์โวลตาอิกประกอบด้วยสองครึ่งเซลล์ ต่อกันแบบขั้วบวกต่อกับขั้วลบเรียงสลับกันไปตามลำดับหรือเรียกว่าการต่ออนุกรม โดยทั้งขั้วบวกและขั้วลบจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยขั้วอิเล็กโทรดที่ส่งผ่านประจุลบ เรียกว่า แอโนด และขั้วอิเล็กโทรดที่ส่งผ่านประจุบวก

เรียกว่า แคโทด ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในด้านแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เป็นปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอน และด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาการดึงอิเล็กตรอน ซึ่งรวมเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ และอิเล็กโทรดทั้งสองด้านจะไม่สัมผัสกันโดยตรงแต่จะเกิดเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นได้ทั้งของแข็งและของเหลว เซลล์ของแบตเตอรี่นี้จะถูกปิดผนึกไว้ในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งถูกแยกไว้ด้วยแผ่นกั้นที่มีรูพรุน (separator) เพื่อกั้นไม่ให้อิเล็กโทรดสัมผัสกัน เมื่อพิจารณาส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่จะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ขั้วบวก (Positive Electrode) ขั้วลบ (Negative Electrode) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และแผ่นกั้น (Separator)

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่จะถูกกำหนดโดยวัสดุที่ใช้สร้าง โดยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นแต่ละขั้วอิเล็กโทรดจะให้ค่าศักย์ทางไฟฟ้าค่าหนึ่ง เช่น เซลล์แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด ที่ขั้วบวกจะให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ (-) 1.685 โวลต์ ส่วนที่ขั้วลบจะให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ (+) 0.365 โวลต์ ดังนั้นผลรวมของแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 2.05 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันทางไฟฟ้านี้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด นอกจากศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแต่ละขั้วอิเล็กโทรดแล้ว ความเข้มข้นของกรดภายในแบตเตอรี่ก็ส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าโดยทั่วไปที่ได้จากแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดจะประมาณ 2.15 โวลต์ สำหรับเซลล์นิเกิล-แคดเมียมให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 1.2 โวลต์ ส่วนเซลล์ลิเทียมให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงถึง 4 โวลต์

แบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์ที่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าภายใน ดังนั้นวิธีการต่อของแต่ละเซลล์และชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นเซลล์จึงเป็นปัจจัยที่กำหนดขนาดของแรงดันไฟฟ้าและขนาดความจุไฟของแบตเตอรี่ การต่อขั้วบวกของเซลล์หนึ่งเข้ากับขั้วลบของอีกเซลล์ถัดไป และต่อสลับกันไปเรื่อยๆ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้เท่ากับผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์รวมกัน เรียกการต่อแบบนี้ว่าการต่อแบบอนุกรม และวิธีการต่อขั้วบวกของทุกเซลล์เข้าด้วยกันและต่อขั้วลบของทุกเซลล์เข้าด้วยกัน จะทำให้ค่าความจุไฟของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น เรียกการต่อแบบนี้ว่าการต่อแบบขนาน [7]

2.1.3 ประเภทของแบตเตอรี่

ในปัจจุบันแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (primary battery) และแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (secondary battery)

1. แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (primary battery) คือ แบตเตอรี่ที่ไม่สามารถประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพื่อแปลงพลังงานเคมีเป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่นั้นเป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถผันกลับได้ เมื่อแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนหมดหรือสารตั้งต้นในปฏิกิริยาหมด จะต้องทิ้งแบตเตอรี่ไป ตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิได้แก่ อัลคาไลน์แบตเตอรี่ (Alkaline battery) เซลล์เลอคลังเช (LeClanche Cell) และเซลล์ปรอท (Mercury Cell) เป็นต้น

2. แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (secondary battery) คือ แบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพื่อแปลงพลังงานเคมีเป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่นั้นเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่จ่ายประแสไฟฟ้าจนหมด ก็ยังสามารถนำแบตเตอรี่ไปประจุไฟฟ้า และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium battery) แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบพอลิเมอร์ แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมแบตเตอรี่ (Nickel-cadmium battery) และแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery)

แม้แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิจะสามารถประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากการประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปในแบตเตอรี่นั้น สมบัติของขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง อาจเกิดการกัดกร่อนของอิเล็กโทรด และการสูญเสียอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะทำแบตเตอรี่ทุติยภูมิมีอายุการใช้งานที่จำกัด สามารถวัดได้เป็นจำนวนครั้งในการจ่ายและการอัดประจุ *(*charging / discharging*)* โดยอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นกับลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่ [8, 9]

2.2 ความหมายของตัวแปร คำจำกัดความ และสมรรถนะของแบตเตอรี่

การใช้แบตเตอรี่ต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับศัพท์เทคนิคและความหมาย บอกให้ทราบสมบัติของแบตเตอรี่นั้นๆ เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกใช้งาน ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างโดยใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ดังนี้

2.2.1 **กระแสไฟฟ้า** (Current)

กระแสไฟฟ้าคือ ปริมาณการไหลของประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าต่อหน่วยวินาที ซึ่งหมายถึงประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดของขดลวดตัวนำไฟฟ้าในเวลา 1 วินาที และมีหน่วยเป็น แอมแปร์ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้เป็น

$$I = Q/T \qquad (2.1)$$

เมื่อ I = ปริมาณกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
Q = ปริมาณประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)
T = เวลา (วินาที)

กระแสไฟฟ้านั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าความต่างศักย์ โดยการที่ประจุจะสามารถไหลในลวดตัวนำนั้นจำเป็นต้องมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 2 จุด ซึ่งในแบตเตอรี่นั้นกระแสไฟฟ้าจะเป็นตัววัดอัตราการอัดและอัตราการคายประจุไฟฟ้า ความเร็วในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะขึ้นกับความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และการออกแบบวัสดุว่องไว (active material) หากวัสดุว่องไวมีปริมาณมากและมีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่น การถ่ายโอนอิเล็กตรอนจะทำได้ดี โดยทั่วไปจะมีการออกแบบให้วัสดุว่องไวมีลักษณะพรุนเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา โดยในกระบวนการอัดและคายประจุ วัสดุว่องไวจะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้าง เช่น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ที่ขั้วไฟฟ้าลบ แผ่นธาตุตะกั่ว (Pb) จะเปลี่ยนไปเป็นตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) ในกระบวนการคายประจุไฟฟ้า เป็นต้น [10,11]

2.2.2 **ความต่างศักย์** (voltage)

ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ขึ้นกับประเภทปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแต่ละชนิดแบตเตอรี่ จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ระดับการคายและอัดประจุของเซลล์ อุณหภูมิและอื่นๆ ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่แสดงดังสมการที่ 2.2 [10, 12]

$$V = E^0 - |\eta_A| - |\eta_C| - IR_{cell} \qquad (2.2)$$

เมื่อ V = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

E^0 = ศักย์ไฟฟ้ามาตราฐานของเซลล์เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน ($E_e^C - E_e^A$, โวลต์)

$|\eta_A|$ = ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของขั้วแคโทดและแอโนด (โวลต์)

$|\eta_C|$ = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Over potential) เนื่องจากความเข้มข้น (โวลต์)

IR_{cell} = ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์ (โวลต์)

โดยทั่วไปค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมีค่าประมาณ 2 โวลต์ต่อเซลล์ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีเซลล์ทั้งหมด 6 เซลล์ต่ออนุกรมกัน ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่รวมทั้งหมดประมาณ 12 โวลต์ต่อ ซึ่งค่าแรงดันที่แท้จริงของแบตเตอรี่จะเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับภาวะการทำงาน ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับแบตเตอรี่จำเป็นต้องจำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าใน 2 ภาวะต่อไปนี้ คือ จำกัดค่าแรงดันสูงสุดในภาวะการอัดประจุ และจำกัดค่าแรงดันต่ำสุดในภาวะการคายประจุ นอกจากนี้ยังต้องจำกัดค่าแรงดันเพื่อป้องกันการเกิดแก๊สในภาวะการอัดประจุอีกด้วย

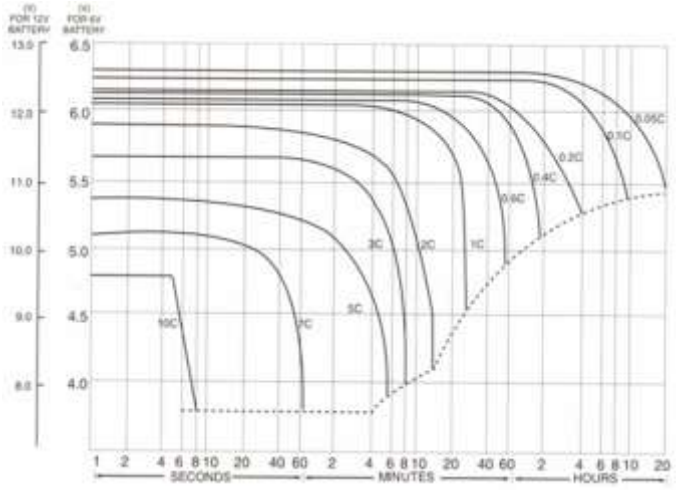
2.2.3 **ความจุของแบตเตอรี่** (Battery Capacity)

ความจุของแบตเตอรี่คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกไป กล่าวคือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถคายประจุได้จนกระทั่งหยุดการคายประจุ โดยความจุปกติของแบตเตอรี่ (Nominal Capacity, C_n) มีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ขณะคายประจุ (I_n) คูณด้วย เวลาทั้งหมดในการคายประจุจนหมด (t_n) แสดงดังสมการที่ 2.3

$$C_n = I_n \times t_n \qquad (2.3)$$

ค่าความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าไม่คงที่โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แรงดันและกระแสไฟฟ้าขณะคายประจุ หากกระแสไฟฟ้าขณะคายประจุมีค่าต่ำจะทำให้กรดซัลฟิวริกค่อยๆ แตกตัวและทำปฏิกิริยากับแผ่นธาตุเกิดการสะสมเป็นชั้นตะกั่วซัลเฟตอย่างช้าๆ ซึ่งช่วยให้การแทรกซึมของ

กรดซัลฟิวริกทำได้ลึกกว่า แต่ในทางกลับกันหากกระแสไฟฟ้าขณะคายประจุมีค่าสูงจะทำให้เกิดสะสมเป็นชั้นตะกั่วซัลเฟตอย่างรวดเร็ว และทำให้การแทรกซึมของกรดซัลฟิวริกทำได้ไม่ลึกพอ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าของการคายประจุมากจึงต้องพยายามให้กระแสไฟฟ้าขณะคายประจุมีค่าต่ำและใช้เวลานานขึ้น โดยค่าความต่างศักย์ที่ใช้กำหนดจุดตัดในการคายประจุจะขึ้นกับอัตราเร็วในการคายประจุของแบตเตอรี่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

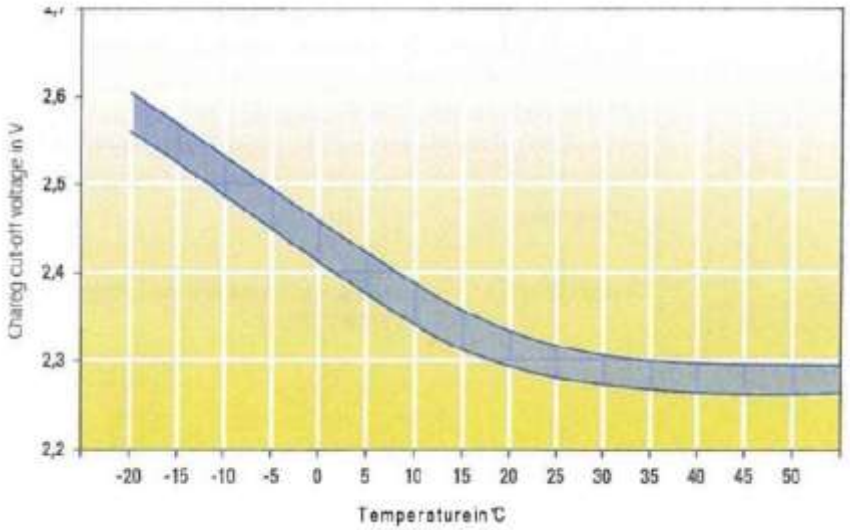


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการคายประจุ จุดตัดของค่าความต่างศักย์ที่อัตราเร็วในการคายประจุต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด [13]

2.2.4 **การอัดและการคายประจุ** (Charging and Discharging)

การอัดประจุไฟฟ้า (Charge) เมื่อต่อแบตเตอรี่เข้ากับเครื่องประจุไฟฟ้าโดยต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่เข้ากับขั้วบวกของเครื่องประจุไฟฟ้า และต่อขั้วลบของแบตเตอรี่เข้ากับขั้วลบของเครื่องประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ ทำให้สารประกอบซัลเฟตที่แผ่นธาตุทั้งสองละลายตัวออกมารวมตัวกับน้ำกลายเป็นน้ำกรดอีกครั้ง ดังนั้นจะเห็นว่าขณะที่แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าจะเกิดตะกั่วซัลเฟต (ขี้เกลือ) ขึ้นที่แผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ กรดกำมะถันจะถูกใช้ไปและเกิดน้ำขึ้นมาแทน และขณะที่อัดประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะไปแยกตะกั่วซัลเฟตออกจากแผ่นธาตุโดยน้ำจะแยกตัวเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจนจากอนุมูลซัลเฟตจะรวมตัวกับไฮโดรเจนกลายเป็นกรด จะเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้สลับไปมาจนกระทั่งแผ่นธาตุทั้งสองเสื่อมสภาพไม่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้

ในกระบวนการอัดประจุ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น หากปล่อยให้ค่าความต่างศักย์สูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้เกิดแก๊สขึ้นภายในแบตเตอรี่ เรียกความต่างศักย์นั้นว่า gassing voltage โดยน้ำจะถูกแยกเกิดเป็นแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจน (oxy-hydrogen gas) ซึ่งสามารถจุดติดไฟและระเบิดได้ง่าย ดังนั้นจึงควรจำกัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะอัดประจุไม่ให้เกินค่าๆ หนึ่งที่เรียกว่า ค่าแรงดันปลดออก (charge cut-off voltage) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งค่าศักย์ปลดออกของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ด้วย



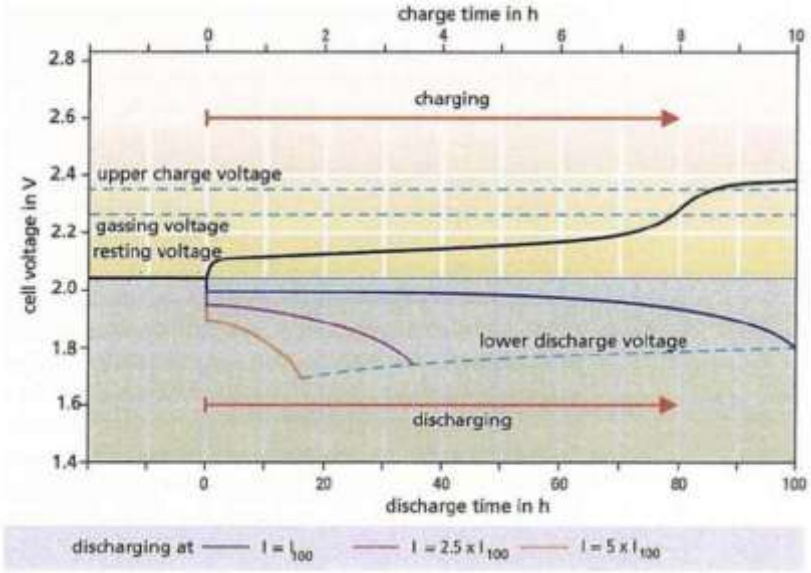
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage [11]

การคายประจุหรือการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Discharge) เมื่อต่อแบตเตอรี่เข้ากับวงจรภายนอก แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ทันที กระแสไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) กับแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือ แก๊สออกซิเจนที่แผ่นธาตุบวก โดยแก๊สออกซิเจนจะรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเกิดเป็นน้ำ และที่แผ่นขั้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบซัลเฟตหรือขี้เกลือ (คราบหรือผลึกสีขาว) ทั้งที่แผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ

สำหรับกระบวนการคายประจุ เมื่อเริ่มคายประจุค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกลงอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบนตัวต้านทานภายในของแบตเตอรี่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร จากนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงอย่างต่อเนื่องและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ

ใกล้สิ้นสุดกระบวนการ หรือจนถึงค่าแรงดันปลดออก (discharge cut-out voltage) ในคายประจุ หากปล่อยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงต่อไปจนกระทั่งต่ำกว่าค่า discharge cut-out voltage จะทำให้กรดมีความเข้มข้นสูงมากจนเกิดเป็นผลึกซัลเฟตหรือเรียกว่าเกิดซัลเฟชัน

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในกระบวนการอัดและคายประจุและแสดงค่า charge cut-off voltage (หรือ upper charge voltage), discharge cut-out voltage (หรือ lower discharge voltage) และ gassing voltage



รูปที่ 2.4 ลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 100 แอมแปร์-ชั่วโมงขณะเกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ [11]

2.2.5 อัตราการอัดประจุและอัตราการคายประจุ

อัตราการอัดประจุและอัตราการคายประจุ จะใช้การเปรียบเทียบค่ากระแสที่ถูกใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่และขึ้นกับค่าความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะแสดงเป็นจำนวนชั่วโมงที่ใช้ เช่น อัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) และอัตรา 240 ชั่วโมง (240 hour rate) เป็นต้น ค่ากระแสที่ใช้ในการอัดประจุและคายประจุสามารถคำนวณได้จากค่าความจุที่แบตเตอรี่สามารถคายประจุได้ หารด้วยจำนวนชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$\text{อัตรา(การอัดประจุ/การคายประจุ)} = \frac{\text{ค่าความจุ (แอมแปร์-ชั่วโมง)}}{\text{เวลา (ชั่วโมง)}} \qquad (2.4)$$

ตัวอย่างเช่น C/10 (0.1C) หรืออัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) หมายถึงค่ากระแสเทียบเท่า Rated Capacity ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง หารด้วย 10

2.2.6 ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge) และการอัดประจุ (State of Charge)

ค่าความลึกของการคายประจุหรือดีโอดี (Depth of Discharge, DOD) เป็นค่าสัดส่วนหรือร้อยละของความจุที่ถูกใช้งานไปจากเดิมทีมีการอัดประจุเต็ม และส่วนกลับของค่าดีโอดีคือค่าเอสโอซี หรือค่าภาวะการอัดประจุ (State of Charge, SOC) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนหรือร้อยละของความจุที่ยังคงใช้งานได้ อาจพิจารณาคล้ายแก้วน้ำซึ่งมีน้ำอยู่ระดับหนึ่งซึ่งจะมีส่วนที่ว่างเปล่าหรือส่วนจะต้องเติมให้เต็ม ดังนั้นค่าดีโอดีคือความสูงของส่วนที่ว่างเปล่าไม่มีน้ำในแก้ว และค่าเอสโอซีคือความสูงของน้ำที่มีอยู่ในแก้ว ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของค่าดีโอดีและค่าเอสโอซี [7]

เอส โอซี (% SOC)	ดี โอดี (% DOD)
100	0
75	25
50	50
25	75
0	100

อย่างไรก็ตามค่าดีโอดีหรือเอสโอซีจะใช้เพื่ออ้างอิงความจุปกติ (Nominal Capacity) ตัวอย่างเช่น ความจุที่อัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) การจ่ายกระแสต่ำจะให้ค่าดีโอดีมากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งมีความหมายอย่างง่ายคือ แบตเตอรี่มีความจุในการใช้งานได้มากกว่าร้อยละ 100 เมื่ออัตราการคายประจุต่ำกว่าอัตราการคายประจุปกติ ซึ่งค่าเอสโอซีมีความสัมพันธ์กับค่าความต่างศักย์ภายในแบตเตอรี่ดังที่แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเอสโอซีกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ [14]

State of Charge	12 Volt battery	Volts per cell
100%	12.70	2.12
90%	12.50	2.08
80%	12.42	2.07
70%	12.32	2.05
60%	12.20	2.03
50%	12.06	2.01
40%	11.90	1.98
30%	11.75	1.96
20%	11.58	1.93
10%	11.31	1.89
0%	10.50	1.75

โดยทั่วไปการวัดปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ (State of charge) มี 2 วิธี

วิธีที่ 1 สำหรับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลว สามารถทราบได้จากค่าความหนาแน่นของกรด (Acid density) ซึ่งวัดโดยไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) โดยแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะมีค่าต่างกัน

วิธีที่ 2 สำหรับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นแบบเจล ไม่สามารวัดค่าความหนาแน่นของกรด (Acid density) ได้จึงต้องวัดระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าแทน แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องทราบระดับแรงดันวงจรเปิดขณะเริ่มต้น (resting voltage) ก่อนทุกครั้ง เพื่อใช้อ้างอิงเป็นค่าเริ่มต้นที่ภาวะการประจุเป็นร้อยละ 0 และต้องปล่อยแบตเตอรี่ไว้โดยไม่ต่อวงจรไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมงก่อนทำการวัดแรงดัน

2.2.7 อัตราการคายประจุด้วยตัวเอง

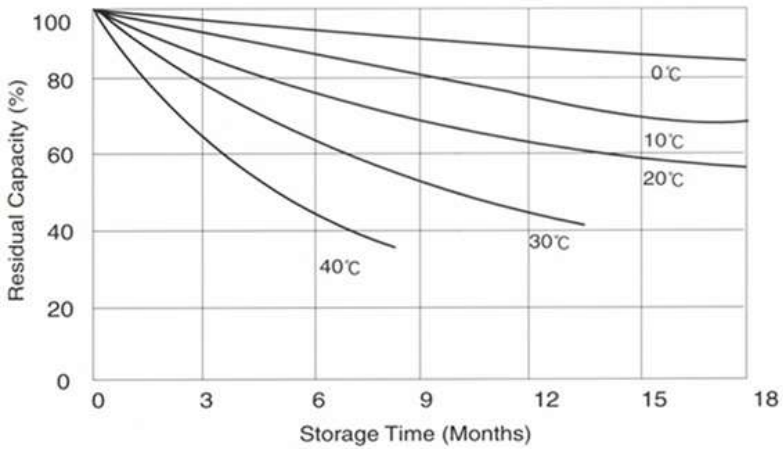
ในกรณีที่แบตเตอรี่ไม่ได้ถูกใช้งาน หากปล่อยแบตเตอรี่ทิ้งไว้ที่วงจรเปิดหรือไม่มีกระแสในระยะเวลาหนึ่ง แบตเตอรี่จะเกิดการคายประจุด้วยตัวเอง ซึ่งเป็นการสูญเสียประจุของแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ปฐมภูมิที่ถูกวางบนชั้นจำหน่ายในร้านค้า เมื่อผ่านไปหลายๆ ปี จะพบว่าค่าความจุจะเหลืออยู่ไม่เท่ากับความจุตั้งต้น แต่สำหรับแบตเตอรี่ทุติยภูมินั้นอัตราการคายประจุด้วยตัวเองจะอ้างถึงด้วยร้อยละความจุที่หายไปต่อเดือนโดยตั้งต้นที่ค่าความจุเต็มพิกัด นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ควบคู่ไปด้วยกัน เนื่องจากค่าการคายประจุด้วยตัวเองจะมากขึ้นเป็นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.5

โดยอัตราการคายประจุด้วยตัวเองขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การประจุไฟฟ้าเกิน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของกรด โดยอัตราการเกิดแก๊สจะเพิ่มขึ้นหากกรดมีความเข้มข้นสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการคายประจุด้วยตัวเองแสดงดังนี้

ขั้วบวก : $PbO_2 + H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4 + H_2O + 1/2O_2$ (2.5)

ขั้วลบ : $Pb + H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4 + H_2$ (2.6)

สำหรับขั้วลบการสะสมของตะกั่วซัลเฟตจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยทั่วไปน้อยกว่า 0.5% ต่อวัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ส่วนการคายประจุด้วยตัวเองที่ขั้วลบจะเกิดขึ้นเร็วกว่าโดยเฉพาะในเซลล์ที่มีการปนเปื้อนของไอออนโลหะ เช่น พลวง (Sb) ที่หลุดออกมาจากตะแกรงขั้วบวกเนื่องจากการถูกกัดกร่อนจะสามารถแพร่ไปยังขั้วลบได้ และจะไปพอกพูนบนแผ่นขั้วลบ ทำให้เกิดการคายประจุเฉพาะจุด ซึ่งตะกั่วบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นตะกั่วซัลเฟต ทับพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาของแผ่นขั้วลบ [8]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วแบบควบคุมกับระยะเวลาในการเก็บที่อุณหภูมิต่างๆ [13]

2.2.8 **การประจุไฟฟ้ามากเกิน** (Overcharge)

การอัดประจุไฟฟ้าเกินจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดประจุ ซึ่งมีการให้ประจุเกินกว่าค่าที่กำหนด ประจุไฟฟ้าส่วนเกินจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ขั้วไฟฟ้า โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้

ขั้วบวก : $H_2O \longleftrightarrow 2H^+ + 1/2O_2(g) + 2e^-$ $E^0 = 1.23$ (2.7)

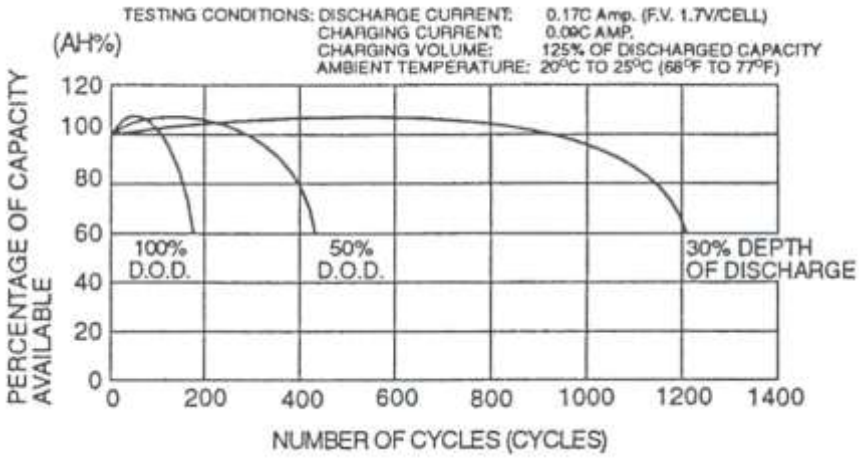
ขั้วลบ : $2H^+ + 2e^- \longleftrightarrow H_2(g)$ $E^0 = 0.00$ (2.8)

ปฏิกิริยารวม : $H_2O \longleftrightarrow H_2(g) + 1/2O_2(g)$ $E^0 = 1.23$ (2.9)

จากสมการจะเห็นว่าที่ขั้วบวกจะเกิดปฏิกิริยาการผลิตแก๊สออกซิเจน (oxygen evolution) และขั้วลบเกิดปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจน (hydrogen evolution) ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาการแยกน้ำ และแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยออกจากแบตเตอรี่เพื่อป้องกันแบตเตอรี่เสียหายเนื่องจากการระเบิด ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่เกิดขึ้น [11]

2.2.9 **วงจรอายุ** (Cycle Life)

การใช้งานของแบตเตอรี่ทุติยภูมิจะมีการคายประจุและการอัดประจุอยู่ซ้ำๆ โดยการคายประจุ 1 ครั้งตามด้วยการอัดประจุ 1 ครั้ง เรียกว่า 1 รอบหรือ 1 ไซเคิล (Cycle) ซึ่งวงจรอายุเป็นการบอกจำนวนรอบของการใช้งานแบตเตอรี่ โดยจำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่จะสัมพันธ์กับความลึกในการคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบอายุการใช้งานกับความลึกในการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วแบบควบคุม [13]

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของจำนวนรอบอายุการใช้งานกับความลึกในการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วแบบควบคุมที่ใช้ในรถยนต์ [15]

Depth of Discharge (% of Rated Capacity)	Number of Cycles to End of Life
10	2000
30	670
50	400
80	250
100	200

2.2.10 **ประสิทธิภาพ** (efficiency)

การวัดประสิทธิภาพของแบตเตอรี่นิยมวัดเป็นประสิทธิภาพของการอัดประจุ (charge efficiency) หรืออาจเรียกว่า ประสิทธิภาพของแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah efficiency) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$\text{Ah efficiency (\%)} = \frac{\text{Capacity of discharge}}{\text{Capacity of charge}} \times 100 \qquad (2.10)$$

2.3 **แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด** (Lead-acid battery)

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดเป็นแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ ที่สามารถอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ ซึ่งในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการใช้เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า โดยความต้องการใช้งานนั้นมีตั้งแต่ขนาดเล็กที่ให้ค่าความจุน้อยสำหรับการใช้งานทั่วไป จนถึงขนาดใหญ่ที่ให้ค่าความจุหลายเมกะวัตต์สำหรับเรือดำน้ำ สาธารณูปโภค และอื่นๆ โดยการนำแบตเตอรี่ไปใช้งานสามารถจำแนกเป็นประเภทหลักๆ ได้ดังนี้ [16]

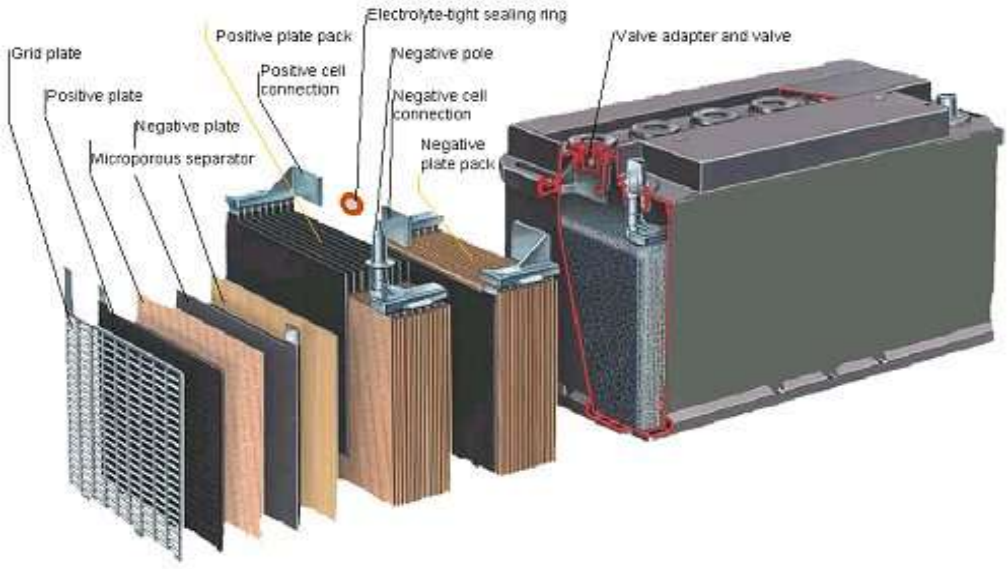
1. แบตเตอรี่รถยนต์ (Starting, Lighting, Ignition Batteries, SLI Batteries) เป็นแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาใช้กับงานในลักษณะการคายประจุน้อย (shallow cycle) นิยมนำมาใช้ในรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ สำหรับสตาร์ตเครื่องยนต์ในเครื่องยนต์ประเภทเผาไหม้ภายใน และให้กำลังไฟฟ้าในระบบฉุกเฉินเมื่อเครื่องยนต์ไม่ทำงาน เช่น การเปิดไฟหน้ารถยนต์ขณะที่เครื่องยนต์ไม่ทำงาน เป็นต้น โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้มีแผ่นขั้วที่บางทั้งแผ่นขั้วบวกและแผ่นขั้วลบ เพื่อเพิ่มพื้นที่ทำปฏิกิริยา การที่แผ่นขั้วมีพื้นที่ทำปฏิกิริยามากนั้น ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถจ่ายกระแสสูงๆ ในเวลาสั้นๆ ได้
2. แบตเตอรี่สำหรับการใช้งานประจำที่ (Stationary Batteries) แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้า เช่นระบบไฟฟ้าสำรอง (Uninterruptible Power Supply, UPS) เพื่อจ่ายไฟฟ้าสำรองให้กับระบบคอมพิวเตอร์ ระบบโทรศัพท์ และระบบไฟฟ้าอื่นๆ มักใช้งานในระบบไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการออกแบบให้สามารถคายประจุได้มาก (deep cycle)
3. แบตเตอรี่รถไฟฟ้า (Motive Power or Traction Batteries) แบตเตอรี่ชนิดนี้ได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่มีการคายประจุมาก (deep cycle) ส่วนใหญ่ใช้กับ

รถยนต์ไฟฟ้า รถยกไฟฟ้า รถไฟฟ้าในสนามกอล์ฟ แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีจำนวนแผ่นขั้วต่อเซลล์น้อยกว่าแบบที่ใช้ในรถยนต์ แต่แผ่นขั้วมีขนาดหนาและทนทานกว่า สามารถคายประจุได้มาก มีอายุการใช้งานนาน และมีความทนทาน

4. แบตเตอรี่เฉพาะวัตถุประสงค์ (Special Propose Batteries) แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการออกแบบตามวัตถุประสงค์เป็นพิเศษ เช่นใช้เทคนิคพิเศษในการทำให้อิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะที่ยากต่อการเคลื่อนไหว ตัวอย่างแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้แก่ แบตเตอรี่สำหรับใช้ในระบบเครื่องบิน เรือ เรือดำน้ำ และทางการทหาร เป็นต้น

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแต่ละชนิดเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะเป็นที่นิยมในการใช้งาน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นจะพบว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากกว่า ทำให้มีอัตราส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ได้ต่อปริมาตร (energy per volume) และต่อมวล (energy per mass) ของแบตเตอรี่ที่น้อยกว่า แต่ทว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดนี้มีราคาถูก จึงทำให้เป็นที่นิยมแก่การเลือกใช้ หากขนาดของพื้นที่ติดตั้งไม่มีผลต่อการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ

2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด [17]

1. วัสดุว่องไวขั้วบวก (Active material in positive electrodes) ทำจากตะกั่วออกไซด์ที่มีรูพรุนและพื้นผิวสูง โดยสัดส่วนของโดยปริมาตรของตะกั่วออกไซด์และรูพรุน เป็น 50:50
2. วัสดุว่องไวขั้วลบ (Active material in negative electrodes) ทำจากธาตุตะกั่ว (Pb) ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงอาจมีการเติมสารเติมแต่งบางชนิดเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปมักเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สารเติมแต่งที่มักผสมในวัสดุว่องไวขั้วลบ เช่น แบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) และลิกนิน เป็นต้น
3. ตะแกรงขั้ว (Grid) เพื่อเป็นโครงสำหรับอัดวัสดุว่องไว และเป็นส่วนที่นำกระแสไฟฟ้า มักทำจากตะกั่วบริสุทธิ์ หรืออัลลอยด์ของตะกั่ว-แคลเซียม (Pb-Ca) อาจมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานของแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ที่มีจำนวนรอบการใช้งานสูง จะทำจากอัลลอยด์ของตะกั่ว-พลวง (Pb-Sb) แบตเตอรี่ที่มีจำนวนรอบการใช้งานต่ำ จะทำจากตะกั่วบริสุทธิ์ (Pb) หรือ ตะกั่ว-แคลเซียม (Pb-Ca) หรือ ตะกั่ว-แคลเซียม-ดีบุก (Pb-Ca-Sn)
4. แผ่นกั้น (Separator) เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นธาตุขั้วบวกและขั้วลบสัมผัสกัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการลัดวงจรในแบตเตอรี่ นอกจากนี้แผ่นกั้นยังต้องการพื้นที่ว่างหรือรูพรุนสำหรับการถ่ายเทอิเล็กโทรไลต์ด้วย แผ่นกั้นที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) แผ่นกั้นดูดซึมใยแก้ว (AGM) และพอลิเอทิลีน (PE) เป็นต้น
5. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปจะใช้ความถ่วงจำเพาะที่ 1.20 – 1.34 นอกจากนี้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ยังเป็นแหล่งของซัลเฟตไอออน สำหรับเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่
6. เซลล์ (Cell) คือช่องที่บรรจุแผ่นขั้วลบและแผ่นขั้วบวก ที่วางสลับกันด้วยแผ่นกั้น แล้วบรรจุด้วยน้ำกรด ในเซลล์หนึ่งจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2.1 โวลต์ โดยในส่วนบนเป็นที่เติมน้ำกรด และมีฝาปิดป้องกันน้ำกรดกระเด็นออกมา และที่ฝาปิดก็จะมีรูระบายแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีออกไป
7. ขั้วเชื่อมต่อ (Connecting elements) สำหรับเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าหลายขั้วในแต่ละเซลล์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับขั้วไฟฟ้า โดยแบตเตอรี่จำเป็นต้องเชื่อมต่อเซลล์หลายๆ เซลล์เข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ให้สูงขึ้นตามการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยปกติ

แผ่นขั้วนอกสุดทั้งสองด้านของเซลล์จะเป็นแผ่นขั้วลบ ดังนั้นจะมีแผ่นขั้วบวกเป็นจำนวน n แผ่น และแผ่นลบเป็นจำนวน n+1 แผ่น

8. วาล์วหรือฝาปิดเซลล์ (Valve or battery cell plug) เป็นส่วนที่สำคัญสำหรับแบตเตอรี่ชนิดวาล์วควบคุม เป็นวาล์วสำหรับระบายแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดประจุเกิน เพื่อป้องกันไม่ให้ความดันภายในเซลล์แบตเตอรี่สูงเกินไป โดยทั่วไปวาล์วจะทำมาจากยาง มีลักษณะเป็นฝาครอบเพื่อครอบส่วนของเซลล์ที่เปิดเอาไว้สำหรับใส่วาล์ว ในภาวะปกติฝาครอบนี้จะปิด หากความดันภายในเซลล์สูงเกินไป ฝาครอบนี้จะเปิดขึ้นเพื่อระบายความดันภายในเซลล์ ป้องกันไม่ให้เซลล์แบตเตอรี่บวมหรือบิดเบี้ยว

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบภายนอกคล้ายกัน ซึ่งในอดีตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดจะมีสารอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลวและแบตเตอรี่จะมีฝาเปิดสำหรับเติมน้ำกลั่นลงไป เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการสูญเสียน้ำมากระหว่างการใช้งาน แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น และไม่จำเป็นต้องเติมน้ำกลั่นลงในแบตเตอรี่ เช่น ออกแบบให้แบตเตอรี่มีวาล์วควบคุมเพื่อช่วยระบายแก๊สที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ หรือการใช้อิเล็กโทรไลต์ในลักษณะของเจลเป็นต้น ซึ่งประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3.2 ประเภทของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

2.3.2.1 **แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบอิเล็กโทรไลต์เหลวหรือแบตเตอรี่แบบเปียก** (Flooded battery or Wet cell battery)

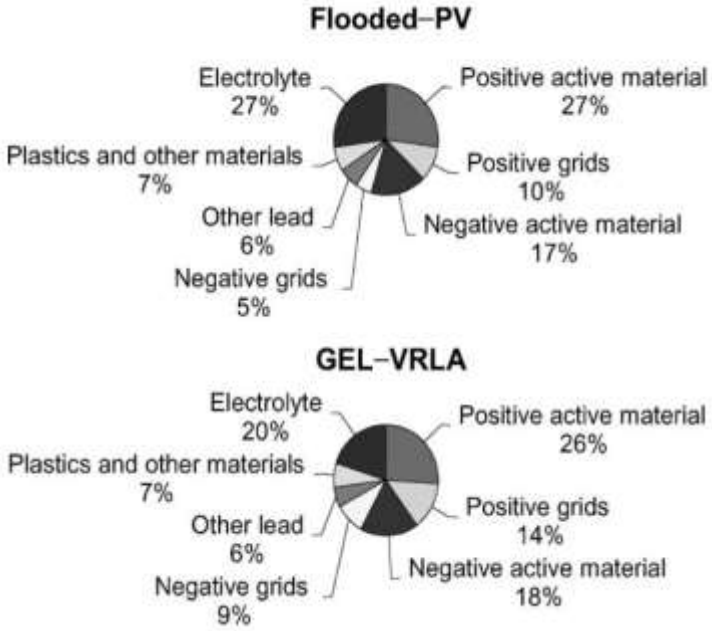
แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบเปียกเป็นแบตเตอรี่ชนิดแรกที่มีการผลิตออกจำหน่ายและยังเป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือกรดซัลฟิวริกอยู่ในสถานะของเหลว จึงเรียกว่า “flood-electrolyte lead acid battery” [18] แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการผลิตในหลายขนาดและมีการออกแบบให้ภาชนะไม่ถูกปิดผนึก (unsealed container) เพื่อสะดวกต่อการเติมน้ำกลั่นลงไปในแบตเตอรี่ เนื่องจากในกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าจะมีการสูญเสียน้ำเกิดขึ้น เพราะประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการอัดประจุไฟฟ้า (recharge reaction) ลดลง (เริ่มจากประสิทธิภาพน้อยกว่าประมาณ 85%) และเนื่องจากการอัดประจุไฟฟ้า

เกิน (overcharge) หลังจากประจุไฟฟ้าสมบูรณ์แล้ว โดยประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดเป็นแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจน ดังที่ได้กล่าวในข้อ 2.2.8ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดนี้จะต้องอยู่ในแนวตั้งตลอดเวลาเพื่อป้องกันการหกของอิเล็กโทรไลต์ และต้องติดตั้งในพื้นที่ที่ระบายอากาศได้เป็นอย่างดีเพื่อระบายแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาข้างเคียง

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบเปียกนี้ต้องการกรดซัลฟิวริกในปริมาณมาก และมีช่องสำหรับเติมน้ำกลั่นเพื่อรักษาระดับของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้อยู่เหนือขั้วอิเล็กโทรดตลอดเวลา และจำเป็นต้องหมั่นตรวจสอบค่าความถ่วงจำเพาะของกรดซัลฟิวริกเพื่อรักษาระดับความเข้มข้นให้เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ และควรอัดประจุไฟฟ้าคืนทันทีหลังการคายประจุไฟฟ้าเพื่อป้องกันการเสื่อมสมรรถภาพของแบตเตอรี่ นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีปัญหาการรั่วซึมของกรด ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องการการบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งาน [4,19]

2.3.2.2 **แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม** (Valve-regulated lead-acid battery)

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม จะมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะที่ยากต่อการเคลื่อนไหว (immobilized electrolyte) และภาชนะบรรจุจะถูกปิดผนึก นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีวาล์วควบคุม (valve-regulated) เพื่อเป็นช่องทางระบายความดันแก๊สที่มากเกินไปในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดประจุไฟฟ้าเกิน เพื่อป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่เสียหาย โดยการที่อิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะที่ยากต่อการเคลื่อนไหวนี้จะสามารถช่วยลดปัญหาการสูญเสียน้ำและการรั่วซึมของกรดในแบตเตอรี่ได้ ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีอายุการใช้งานที่มากกว่าแบตเตอรี่แบบเปียก [18] แบตเตอรี่แบบวาล์วควบคุม จะถูกออกแบบให้ไม่สามารถเปิดออกเพื่อเติมน้ำกลั่นลงในแบตเตอรี่ได้ และใช้อิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่น้อยกว่าเดิมมาก ทำให้การกัดกร่อนของอิเล็กโทรดมีน้อยกว่า โดยเมื่อวิเคราะห์มวลองค์ประกอบของแบตเตอรี่แบบเปียกและแบบวาล์วควบคุม จะพบว่าแบตเตอรี่แบบวาล์วควบคุมจะใช้สารอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่น้อยกว่าแบตเตอรี่แบบเปียก ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 มวลองค์ประกอบของแบตเตอรี่แบบเปียกเทียบกับแบตเตอรี่แบบเจล [4]

เทคโนโลยีที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เทคโนโลยีแผ่นดูดซึมใยแก้ว (Absorptive glass-mat, AGM) และเทคโนโลยีเจลอิเล็กโทรไลต์ (Gel electrolyte) [13,18]

(1) แบตเตอรี่แบบแผ่นดูดซึมใยแก้ว (Absorptive glass-mat battery) แบตเตอรี่ชนิดนี้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดูดซับลงบนแผ่นดูดซึมใยแก้ว (Absorptive glass-mat, AGM) โดยน้ำกรดจะถูกดูดซับไว้ประมาณ 95% แผ่นกั้นนี้จะถูกวางเป็นชั้นๆ ระหว่างแผ่นธาตุ ลักษณะทั่วไปทางกายภาพจะเหมือนกับเจล การพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ ทำให้สามารถใช้งานในภาวะประจุเกินและสภาพแวดล้อมอุณหภูมิสูงได้

(2) แบตเตอรี่แบบเจล (Gelled battery) แบตเตอรี่ชนิดนี้สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกทำให้อยู่ในภาวะที่เป็นเจล โดยการเติมสารตัวเติมที่สร้างโครงสร้างสามมิติ (thixotropic) ลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับดูดซับกรดซัลฟิวริกและน้ำ เช่น ฟูมซิลิกา พอลิไซโลเซน คอลลอยด์ซิลิกา เป็นต้น แบตเตอรี่แบบเจลบางชนิดมีการเติมสารเติมแต่งบางชนิดลงในอิเล็กโทรไลต์เพื่อปรับปรุงความสามารถในการคายประจุของแบตเตอรี่ และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ลักษณะเด่นของแบตเตอรี่แบบวาล์วควบคุมนี้ คือ กระบวนการรวมตัวของแก๊สภายในแบตเตอรี่ โดยในแบตเตอรี่แบบแผ่นดูดซึมใยแก้ว เมื่อกระบวนการอัดประจุของแบตเตอรี่ใกล้ถึงภาวะประจุเต็ม จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ขั้วไฟฟ้าบวกและลบ หากเป็นแบตเตอรี่แบบเปียกแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จำเป็นต้องปล่อยออกจากแบตเตอรี่ ทำให้มีการสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่ จำเป็นต้องเติมน้ำกลั่นเข้าไปทดแทน แต่ในแบตเตอรี่แบบแผ่นดูดซึมใยแก้ว โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกจะสามารถเคลื่อนไปรวมกับโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วลบและรวมตัวกันกลับมาเป็นน้ำอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นแบตเตอรี่แบบแผ่นดูดซึมใยแก้วจึงมีการสูญเสียน้ำที่น้อยกว่า นอกจากนี้แบตเตอรี่แบบเจลก็ยังมีกระบวนการรวมตัวของแก๊สออกซิเจน หรือที่เรียกว่า “Oxygen recombination cycle” [1,4] เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่มีการประจุไฟฟ้าเกิน แก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์โดยผ่านรอยแยกขนาดเล็ก (micro crack) ของเจลไปยังขั้วลบซึ่งเกิดขึ้นได้ดีกว่าในอิเล็กโทรไลต์เหลว โดยออกซิเจนที่เกิดขึ้นนี้จะไปเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วลบ ได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ดังที่แสดงในสมการต่อไปนี้

กระบวนการรวมตัวของแก๊สออกซิเจน (Oxygen recombination cycle)

ขั้วบวก: $H_2O \longrightarrow 2H^+ + 1/2O_2(g) + 2e^-$ (2.11)

ขั้วลบ: $Pb + 1/2O_2(g) + H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4 + H_2O$ (2.12)

ปฏิกิริยารวม: $PbSO_4 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow Pb + HSO_4^-$ (2.13)

แก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วลบและเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วลบตามสมการที่ 2.12 ได้ตะกั่วซัลเฟตและน้ำกลับคืนมา ซึ่งสามารถป้องกันขั้วอิเล็กโทรดขั้วลบไม่ให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงจนทำให้เกิดปฏิกิริยาการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้อิเล็กโทรดมีค่าความต่างศักย์ไม่สูงจนเกินไปหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาผลิตแก๊สไฮโดรเจน แต่จะทำให้ปฏิกิริยาตามสมการ 2.13 เกิดขึ้นแทน ซึ่งเป็นผลดีคือไม่ต้องเติมน้ำให้กับแบตเตอรี่เป็นประจำ ทำให้มีการดูแลรักษาที่ง่ายกว่า และมีอายุการใช้งานที่นานกว่า

ความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมส่งผลกระทบโดยตรงต่อขบวนการ oxygen-recombination cycle และโพลาไรเซชัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องควบคุมและป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป และเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อกำจัดใน

ภาวะการอัดประจุ เช่น แรงดันและอุณหภูมิ การอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดนี้จะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของผู้ผลิต หากไม่มีข้อมูล ไม่ควรประจุเกิน 14.2 V ที่ 25 °C สำหรับแบตเตอรี่ 12 V เพื่อป้องกันการประจุเกิน [7]

สำหรับข้อดีของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดนี้คือ มีจำนวนรอบการใช้งานที่ยาวนานกว่าต้องการการบำรุงรักษาต่ำ ไม่เกิดปัญหาการแบ่งชั้นของกรด (acid stratification) ซึ่งช่วยลดการเกิดซัลเฟชัน ไม่มีการรั่วซึมของกรด สามารถติดตั้งได้ทุกทิศทาง และสามารถนำไปใช้งานอุปกรณ์หลากหลาย เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์สำรองไฟ เซลล์สุริยะ ยานยนต์ต่างๆ เป็นต้น

2.3.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

2.3.3.1 ปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญคือ ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ทำหน้าที่นำไฟฟ้า (Electric conductor) ได้แก่ ขั้วแคโทดหรือขั้วบวก ซึ่งอิเล็กโทรดจะอยู่ในรูปตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) และขั้วแอโนดหรือขั้วลบ ซึ่งอิเล็กโทรดจะอยู่ในรูปธาตุตะกั่ว (Pb) โดยขั้วทั้งสองถูกแยกกันโดยอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำหน้าที่นำอิออน (Ionic conductor) ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง โดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองระหว่างกระบวนการจ่ายไฟฟ้า (Discharging) และการประจุไฟฟ้า (Charging)

เมื่อต่อแบตเตอรี่เข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดหรือขั้วลบไปยังขั้วแคโทดหรือขั้วบวก ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในอุปกรณ์ไฟฟ้า เรียกกระบวนการนี้ว่า การคายประจุ (discharging) โดยที่ขั้วลบแผ่นธาตุตะกั่วจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับซัลเฟตไอออนเกิดเป็นสารประกอบตะกั่วซัลเฟต (Lead sulphate, $PbSO_4$) เกาะอยู่บนผิวของแผ่นธาตุ และที่ขั้วบวก ตะกั่ว(IV)ออกไซด์ จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับกรดซัลฟิวริก โดยมีสารประกอบตะกั่วซัลเฟตและน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาที่ขั้วบวกและลบเมื่อมีการคายประจุแสดงได้ดังสมการ

แคโทด-ขั้วบวก :

$$PbO_2(s) + SO_4^{2-}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^- \longrightarrow PbSO_4(s) + 2H_2O(l) \quad E^0 = 1.686 \quad (2.14)$$

แอโนด-ขั้วลบ :

$$Pb(s) + SO_4^{2-}(aq) \longrightarrow PbSO_4(s) + 2e^- \quad E^0 = -0.355 \quad (2.15)$$

ปฏิกิริยารวม :

$$Pb(s) + PbO_2(s) + 2H_2SO_4 \longrightarrow 2PbSO_4(s) + 2H_2O \quad E^0 = 2.041 \quad (2.16)$$

ซึ่งจะเห็นว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่นี้ มีสารประกอบตะกั่วซัลเฟตเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งที่ขั้วบวกและลบ จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “the double sulfate reaction” [20]

ในกระบวนการคายประจุจะมีตะกั่วซัลเฟตเป็นผลิตภัณฑ์อยู่บนผิวที่ขั้วทั้งสองขั้ว ดังนั้นเมื่อใช้แบตเตอรี่ไประยะหนึ่งความต่างศักย์ระหว่างขั้วลบและขั้วบวกลดลง และจะลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งคู่เหมือนกันจึงไม่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง และเนื่องจากในกระบวนการคายประจุจะมีการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารตั้งต้น และได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์นั้น ทำให้ความเข้มข้นของกรดในแบตเตอรี่ลดลงเรื่อย ๆ จากเดิมที่มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 ถึง 1.34 ขึ้นกับความเข้มข้นกรดที่ใช้และอุณหภูมิในขณะนั้น ๆ จนมีความถ่วงจำเพาะลดลงจนต่ำกว่า 1.20 ที่อุณหภูมิห้อง จึงควรจะมีการประจุไฟฟ้าใหม่ [11]

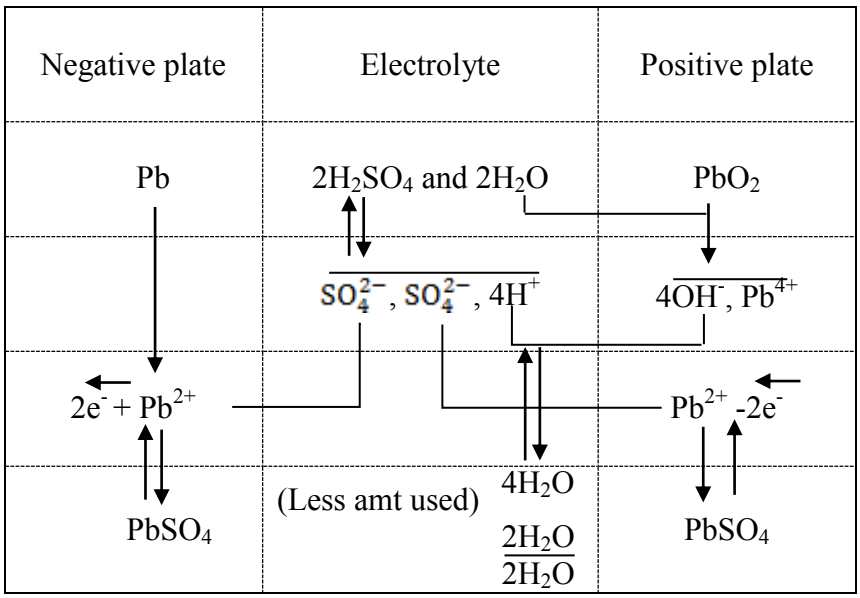
ปฏิกิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ เมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุไฟฟ้าจนหมด จำเป็นต้องมีการอัดประจุไฟฟ้า (charging) เข้าไปใหม่ เพื่อให้ปฏิกิริยาข้างต้นเปลี่ยนทิศทางจากซ้ายไปขวา ซึ่งตะกั่วซัลเฟตที่ขั้วลบ ก็จะเปลี่ยนเป็นตะกั่ว ส่วนขั้วบวกตะกั่วซัลเฟต จะเปลี่ยนเป็นตะกั่ว(IV)ออกไซด์ ในกระบวนการนี้ตะกั่วซัลเฟตเกือบทั้งหมดจะละลายกลับสู่สภาพเดิม แต่ยังคงมีบางส่วนที่ไม่ละลาย ทั้งนี้การทำงานของแบตเตอรี่ประกอบด้วยการคายและการอัดประจุนับเป็น 1 รอบ ปฏิกิริยาที่ขั้วบวกและลบเมื่อมีการอัดประจุแสดงได้ดังสมการ

แอโนด-ขั้วบวก: $PbSO_4(s) + 2H_2O(l) \longrightarrow PbO_2(s) + SO_4^{2-}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^-$ (2.14')

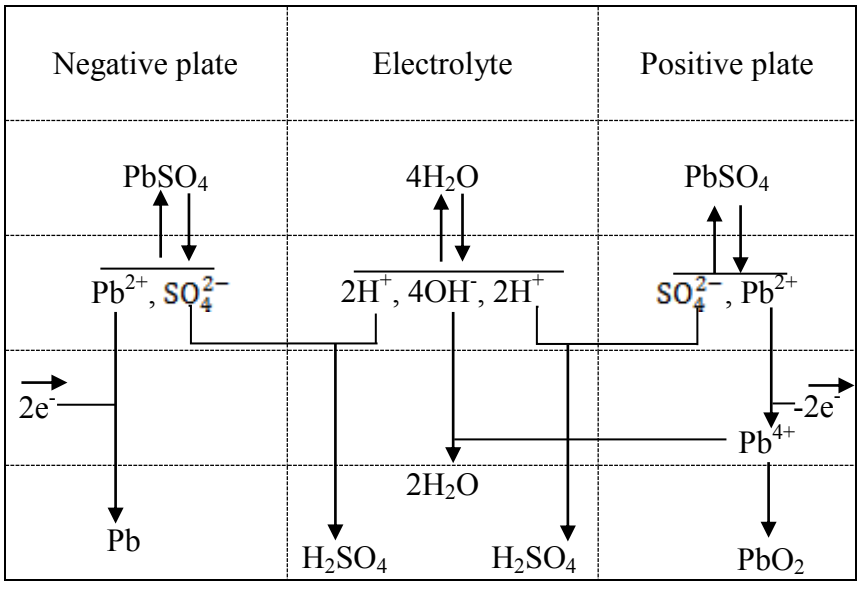
แคโทด-ขั้วลบ: $PbSO_4(s) + 2e^- \longrightarrow Pb(s) + SO_4^{2-}(aq)$ (2.15')

ดังนั้นระหว่างกระบวนการจ่ายและการประจุไฟฟ้าจะมีกลไลการละลายและการพอกพูนของธาตุตะกั่วและตะกั่ว(IV)ออกไซด์ตลอดเวลา และจากปฏิกิริยาเคมีข้างต้นจะเห็นว่ากรดซัลฟิวริกเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และยังทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่หรือที่เรียกว่า “the double sulfate reaction” ระหว่างกระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.9

ก)



ข)

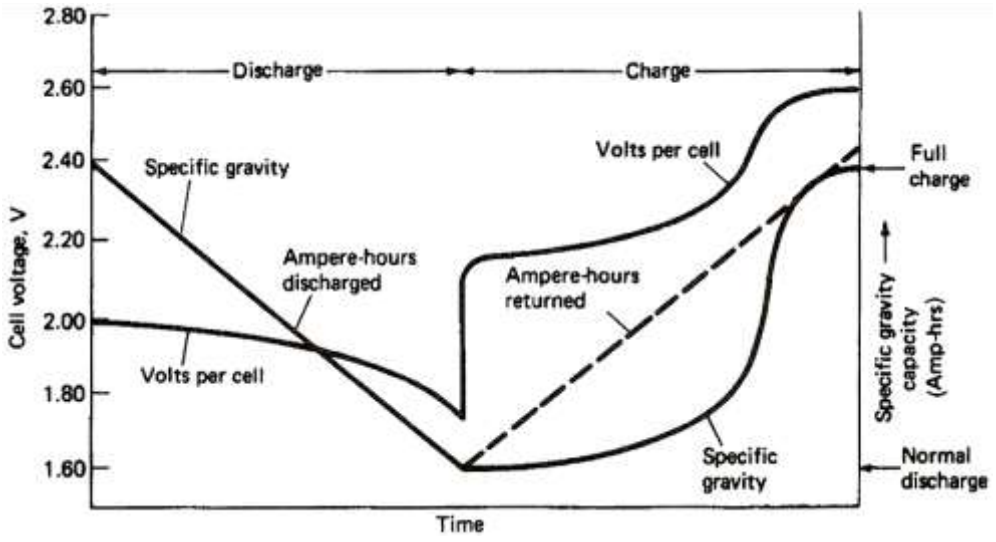


รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการคายและการอัดประจุภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ก) ปฏิกิริยาการคายประจุไฟฟ้า ข) ปฏิกิริยาการอัดประจุไฟฟ้า [8, 21]

โดยทั่วไปแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดจะมีการสูญเสียน้ำระหว่างกระบวนการประจุไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้มาสักระยะ ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการประจุไฟฟ้า (Recharge reaction) จะลดลง และเนื่องจากการประจุไฟฟ้าเกิน (Overcharge) โดยหลังการ

ประจุไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงดังที่ได้กล่าวในข้อ 2.2.8 ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน และออกซิเจนออกจากแบตเตอรี่ทำให้ปริมาณน้ำในแบตเตอรี่ลดลง ส่งผลให้กรดซัลฟิวริกมีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลเสียต่อสมรรถภาพการทำงานของแบตเตอรี่ และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่สั้นลงตลอดจนความสามารถในการเก็บประจุที่ต่ำลง ดังนั้นการเติมน้ำกลั่นตลอดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด จึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ลักษณะการทำงานทั่วไปของเซลล์ตะกั่ว-กรด ในระหว่างการอัดประจุและคายประจุแสดงในรูปที่ 2.10 เมื่อมีการคายประจุค่าความต่างศักย์ของเซลล์จะลดลงเนื่องจากความพร่องของวัสดุอิเล็กโทรด การสูญเสียความต้านทานภายใน และโพลาไรเซชัน หากค่ากระแสในการคายประจุคงที่จะทำให้ค่าความต่างศักย์ลดลงอย่างราบเรียบจนถึงค่าแรงดันตัดออก (cut off voltage) และค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลงอย่างเป็นสัดส่วนกับค่าความจุในการคายประจุ (ampere-hours discharged) ที่ใช้



รูปที่ 2.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความถ่วงจำเพาะของเซลล์ตะกั่ว-กรดที่อัตราการคายประจุและอัตราการอัดประจุคงที่ [8]

2.3.3.2 **แรงดันไฟฟ้าที่จุดสมดุล** (Equilibrium voltage)

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดสมดุล (Equilibrium voltage) [11] ของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก อธิบายได้โดยสมการของเนิร์นสท์ (Nernst equation) ดังสมการ

$$U^{\circ} = 1.923 - \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \frac{(a_{H_2O})^2}{(a_{H^+})^2 \cdot (a_{HSO_4^-})^2} = 1.923 + 0.0592 \cdot \log \frac{a_{H^+} \cdot a_{HSO_4^-}}{a_{H_2O}} \qquad (2.17)$$

เมื่อ U° = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดสมดุลของเซลล์ (โวลต์)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.3145 จูล/โมล.เคลวิน)

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

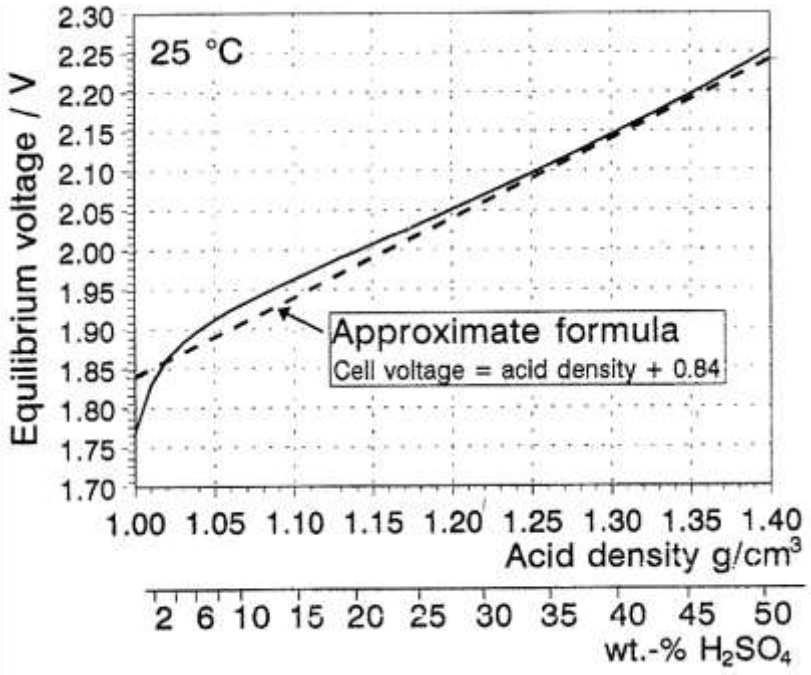
F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 คูลอมบ์)

a_i = ค่าแอกติวิตีของสาร (โมล/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าค่าแรงดันที่จุดสมดุลของเซลล์แบตเตอรี่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของกรด ซึ่งสามารถแสดงค่าแรงดันของเซลล์ (cell voltage) ได้ดังรูปที่ 2.9 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่จุดสมดุลขึ้นกับค่าความเข้มข้นของกรดได้ดังตารางที่ 2.4

$$\text{Equilibrium cell voltage} = \text{acid density (in g/cm}^3 \text{ or kg/dm}^3) + 0.84 \qquad (2.18)$$

สมการที่ 2.18 จะถูกนำมาใช้แทนสมการที่ 2.17 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่กับค่าความหนาแน่นของกรดและค่าเข้มข้นของกรดสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.11 โดยเส้นประที่แสดงในรูปได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.18



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดกับค่าความหนาแน่นของกรดและค่าความเข้มข้นของกรด [11]

ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น (kg/L) ความเข้มข้นในหน่วย mol/L และ mol/kg H_2O ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบวกและลบเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน [11]

Acid-concentration				Cell Voltage U^o Volts	Electrode potentials	
Dens. kg/L	H_2SO_4 wt.%	Molarity mol/L	Molality mol/kg H_2O		V ref. to std. Positive	H_2 electrode Negative
1.02	3.48	0.362	0.367	1.860	1.595	-0.265
1.03	5.00	0.525	0.537	1.883	1.607	-0.276
1.04	6.49	0.688	0.708	1.899	1.616	-0.283
1.05	7.77	0.832	0.859	1.913	1.623	-0.290
1.06	9.42	1.018	1.060	1.924	1.630	-0.294
1.07	10.86	1.184	1.242	1.935	1.634	-0.301
1.08	12.28	1.352	1.428	1.945	1.641	-0.304
1.09	13.69	1.521	1.617	1.955	1.645	-0.310
1.10	15.08	1.691	1.811	1.964	1.650	-0.314
1.11	16.45	1.861	2.007	1.973	1.654	-0.319
1.12	17.80	2.032	2.207	1.982	1.659	-0.323

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น (kg/L) ความเข้มข้นในหน่วย mol/L และ mol/kg H_2O ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบวกและลบเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน [11]

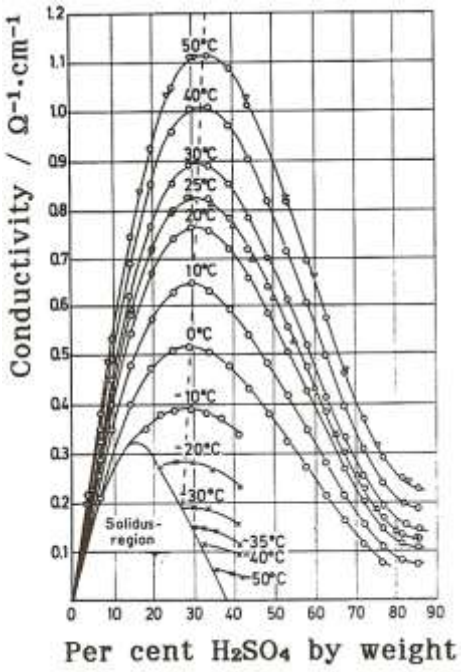
Acid-concentration				Cell Voltage U^o Volts	Electrode potentials	
Dens. kg/L	H_2SO_4 wt.%	Molarity mol/L	Molality mol/kg H_2O		V ref. to std. Positive	H_2 electrode Negative
1.13	19.13	2.204	2.412	1.991	1.663	-0.328
1.14	20.46	2.378	2.623	2.000	1.668	-0.332
1.15	21.78	2.553	2.838	2.008	1.673	-0.335
1.16	23.08	2.729	3.059	2.017	1.667	-0.340
1.17	24.36	2.906	3.283	2.026	1.682	-0.344
1.18	25.63	3.084	3.514	2.034	1.687	-0.347
1.19	26.89	3.262	3.749	2.043	1.691	-0.352
1.20	28.14	3.443	3.992	2.052	1.696	-0.356
1.21	29.38	3.625	4.242	2.061	1.700	-0.361
1.22	30.61	3.807	4.498	2.070	1.705	-0.365
1.23	31.83	3.992	4.760	2.079	1.710	-0.369
1.24	33.05	4.178	5.033	2.088	1.715	-0.373
1.25	34.25	4.365	5.311	2.097	1.720	-0.376
1.26	35.44	4.553	5.597	2.107	1.725	-0.381
1.27	36.62	4.742	5.892	2.116	1.730	-0.386
1.28	37.79	4.932	6.194	2.126	1.735	-0.391
1.29	38.95	5.123	6.506	2.136	1.740	-0.396
1.30	40.10	5.315	6.826	2.145	1.745	-0.400
1.31	41.24	5.508	7.155	2.156	1.751	-0.405
1.32	42.37	5.702	7.496	2.166	1.757	-0.409
1.33	43.49	5.897	7.846	2.176	1.762	-0.414
1.34	44.59	6.092	8.206	2.187	1.768	-0.419
1.35	45.68	6.287	8.573	2.197	1.773	-0.424
1.37	47.80	6.677	9.336	2.219	1.783	-0.436
1.38	48.85	6.873	9.738	2.230	1.788	-0.442
1.39	49.89	7.070	10.149	2.241	1.794	-0.447
1.40	50.91	7.267	10.573	2.252	1.800	-0.452

จากสมการที่ 2.17 ค่าแรงดันที่จุดสมดุลจะขึ้นกับค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ซึ่งกรดซัลฟิวริกจะถูกใช้ในปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว เมื่อมีการคายประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ ค่าความเข้มข้นของกรดจะลดลง และจะมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นเมื่อมีการอัดประจุเข้าไปใหม่ ดังนั้นกรดซัลฟิวริกจึงมีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์จะไม่คงที่แม้ในอัตราการคายประจุต่ำ และค่าการนำไฟฟ้าของกรดซัลฟิวริกจะแตกต่างกันไปตาม

ขั้นตอนการคายประจุหรือการอัดประจุ โดยในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบเปียก จะใช้ค่าความเข้มข้นของกรดเป็นตัววัดภาวะการอัดประจุด้วย

2.3.3.3 **ค่าการนำไฟฟ้าของกรดซัลฟิวริก** (Conductivity of sulfuric acid)

เนื่องจากค่าความเข้มข้นของกรดจะเปลี่ยนแปลงตามภาวะการอัดและคายประจุ ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าของกรดซัลฟิวริกจึงแตกต่างกันไปดังที่แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายกรดซัลฟิวริก [11]

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในขั้นตอนการอัดประจุ ค่าการนำไฟฟ้าของกรดจะมีค่าสูงขึ้น (ที่ค่าความเข้มข้นของกรดประมาณร้อยละ 30) และเมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุลึก (deep discharge) ค่าการนำไฟฟ้าของกรดจะลดต่ำลงจนเข้าใกล้ 0 นอกจากนั้นจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำค่าการนำไฟฟ้าของกรดจะลดลงด้วยเช่นกัน

2.3.4 **ขอบเขตการใช้งานและความล้มเหลวในแบตเตอรี่** [7, 22]

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น โดยมีอายุการใช้งานระหว่าง 100 ถึง 800 รอบ และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเสมอแม้ว่าจะไม่มีการคายประจุใดๆ จากแบตเตอรี่ กระบวนการทางเคมีก็ยังคงเกิดขึ้นและเป็นเหตุให้เกิดการคายประจุภายในตัวแบตเตอรี่เอง ทั้งนี้ไม่ควรให้เกิดการคายประจุเกินร้อยละ 3 ต่อเดือน จากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่แสดงดังต่อไปนี้

2.3.4.1 **การแบ่งชั้นของกรด** (Acid stratification)

เกิดจากการที่กรดมีองค์ประกอบของโลหะหนัก ทำให้บริเวณด้านล่างของแบตเตอรี่มีความหนาแน่นของกรดมากกว่าด้านบน ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างกรดชั้นบนและกรดชั้นล่าง ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีการคายประจุบางส่วนอยู่ภายในแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สขึ้นบางส่วน ดังนั้นในช่วงอายุการใช้งานจึงจำเป็นต้องเคลื่อนย้ายแบตเตอรี่บ้าง เพื่อให้เกิดการผสมกันระหว่างกรดชั้นบนและชั้นล่าง เพื่อช่วยลดการคายประจุภายในแบตเตอรี่ ซึ่งปฏิกิริยาการแยกชั้นของกรดเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้

2.3.4.2 **การเกิดซัลเฟชัน** (Sulfation) **และการเกิดเป็นตะกอน** (Sludging)

จะเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่ไม่ได้รับการอัดประจุอย่างเพียงพอหลังจากผ่านการคายประจุแล้ว ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกของตะกั่วซัลเฟตตกตะกอนสะสมอยู่ด้านล่างของแบตเตอรี่ ซึ่งไม่สามารถละลายกลับเข้าไปในสารอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปอีก ซึ่งการสูญเสียซัลเฟตนี้ทำให้ความสามารถในการอัดประจุครั้งต่อไปลดลง และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง และหากการสะสมเป็นตะกอนของตะกั่ว หรือตะกั่วซัลเฟตที่ด้านล่างแบตเตอรี่มีการสะสมจนสูงมากพอ จะทำให้เกิดการลัดวงภายในแบตเตอรี่ได้ โดยปฏิกิริยาการเกิดซัลเฟชันและการเกิดตะกอนนี้เป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้

2.3.4.3 **การกัดกร่อน** (Corrosion)

กระบวนการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นกับแผ่นธาตุหรือโครงแผ่นธาตุที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ เมื่อแรงดันที่ขั้วบวกสูงเกินกว่าปกติจะทำให้ความต้านทานของโครงแผ่นธาตุเพิ่มขึ้น จนในที่สุดเมื่อการกัดกร่อนเกิดเป็นบริเวณกว้าง จะทำให้เกิดการลัดวงจรภายในแบตเตอรี่ได้

2.3.4.4 **การสูญเสียน้ำ** (Drying out)

หากเกิดแก๊สขึ้นในระหว่างการอัดประจุเกินภายในแบตเตอรี่ ทำให้จำเป็นต้องปล่อยแก๊สเหล่านี้ออกจากแบตเตอรี่ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำ ซึ่งทำให้ต้องมีการเติมน้ำอย่างสม่ำเสมอเพื่อชดเชยและไม่ให้แบตเตอรี่หยุดทำงาน

2.3.4.5 **ความล้มเหลวของการปิดภาชนะหรือวาล์ว** (Seal or valve failures)

สำหรับแบตเตอรี่แบบวาล์วควบคุม หากวาล์วหรือภาชนะเกิดการรั่วหรือแตกหักจะทำให้อากาศภายนอกเข้าไปในแบตเตอรี่ได้ ทำให้แผ่นขั้วลบ เกิดการคายประจุเองขึ้น ทำให้แบตเตอรี่สูญเสียค่าความจุประจุ ทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง

2.3.4.6 **ผลของอุณหภูมิ** (Temperature effects)

แบตเตอรี่แบบวาล์วควบคุมมีข้อจำกัดการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบเปียก โดยกระบวนการรวมตัวของแก๊สออกซิเจน (oxygen recombination cycle) นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ดีแบตเตอรี่แบบวาล์วควบคุม จึงไม่จำเป็นต้องมีการเติมน้ำกลั่นลงไปในแบตเตอรี่ แต่ปฏิกิริยาการรวมตัวของแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่แบบวาล์วควบคุมจะมีการประกอบเซลล์ที่หนาแน่นมากกว่า ทำให้มีข้อจำกัดในการระบายความร้อน ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก และการที่มีอุณหภูมิสูงนี้จะทำให้การสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่สูงขึ้น ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ลดลง

2.3.4.7 **ความร้อนเกิน** (Thermal runaway)

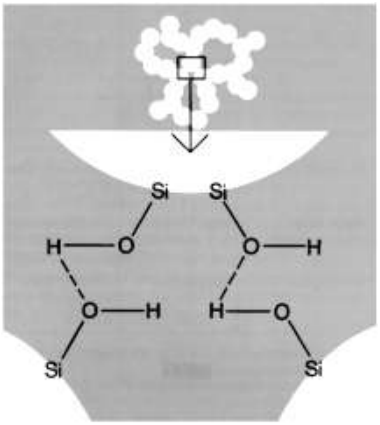
เมื่อแบตเตอรี่มีการอัดประจุไฟฟ้าเกิน พลังงานไฟฟ้าส่วนเกินนี้จะทำให้เกิดความร้อนในแบตเตอรี่ดังที่กล่าวในหัวข้อผลของอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่เกิดการสูญเสียน้ำที่มากขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่นี้เกินกว่าความสามารถที่จะส่งผ่านความร้อนดังกล่าวสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่เกิดการสูญเสียน้ำที่มากขึ้นหรือทำให้เซลล์แบตเตอรี่เกิดการเสียหายหรือระเบิดได้

2.4 **เจลอิเล็กโทรไลต์** [23]

อิเล็กโทรไลต์ในสถานะเจล คือ อิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะที่ยากต่อการเคลื่อนไหว โดยการเติมสารตัวเติม (gelling agent) ที่ทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติ โดยสารตัวเติมที่นิยมใช้ในการสร้างเจลอิเล็กโทรไลต์ได้แก่ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น ซึ่งที่นิยมใช้และให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือซิลิกาไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปของผงซิลิกาหรือที่เรียกว่า ฟูมซิลิกา (Fumed silica) โดยจะช่วยให้แบตเตอรี่มีอายุรอบการใช้งานที่นานขึ้น โดยทั่วไปฟูมซิลิกาจะมีขนาดอนุภาคระหว่าง 5 - 50 นาโนเมตร ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากถึง 50 – 600 ตารางเมตรต่อกรัม

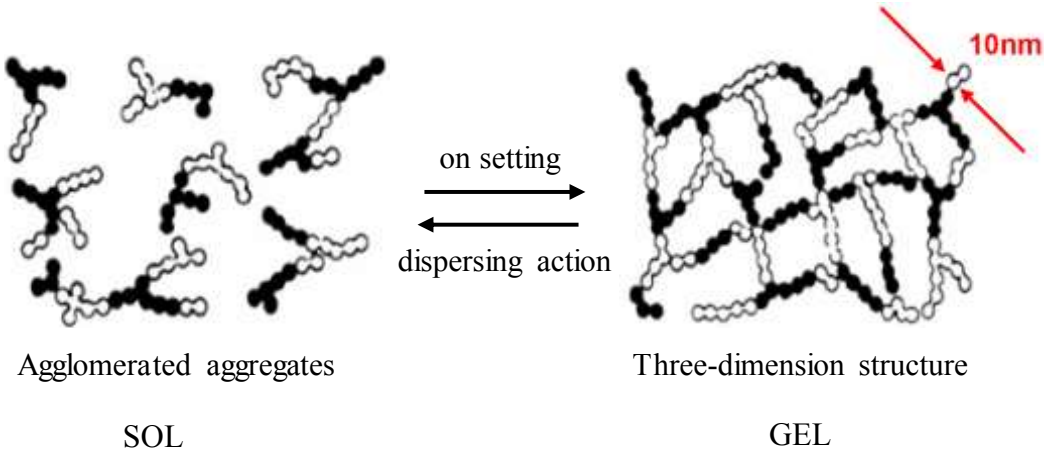
ในขั้นตอนการผลิตฟูมซิลิกา จะใช้ซิลิกอนคลอไรด์ ($SiCl_4$) แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 1500 °C ซึ่งจะทำให้เกิดโมเลกุลของซิลิกาไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตรโดยการสร้างพันธะไซโลเซน (Si – O – Si) ระหว่างอนุภาคของซิลิกา เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เย็นขึ้น อนุภาคจะรวมตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างอ่อนทำให้มีความยาวประมาณ 1 ไมโครเมตร จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเย็นลงอนุภาคจะจับตัวหนาแน่นขึ้นทำให้มีอนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 250 ไมโครเมตร

การจับตัวกันของอนุภาคซิลิกาเมื่อสัมผัสกับไอน้ำจะจับตัวกันด้วยแรงของพันธะไฮโดรเจนเรียกว่า ซิลานอล (Si-O-H) ดังนั้นอนุภาคซิลานอล 2 กลุ่มจึงรวมตัวกันและสร้างพันธะโดยการแลกเปลี่ยนโมเลกุลของไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.13

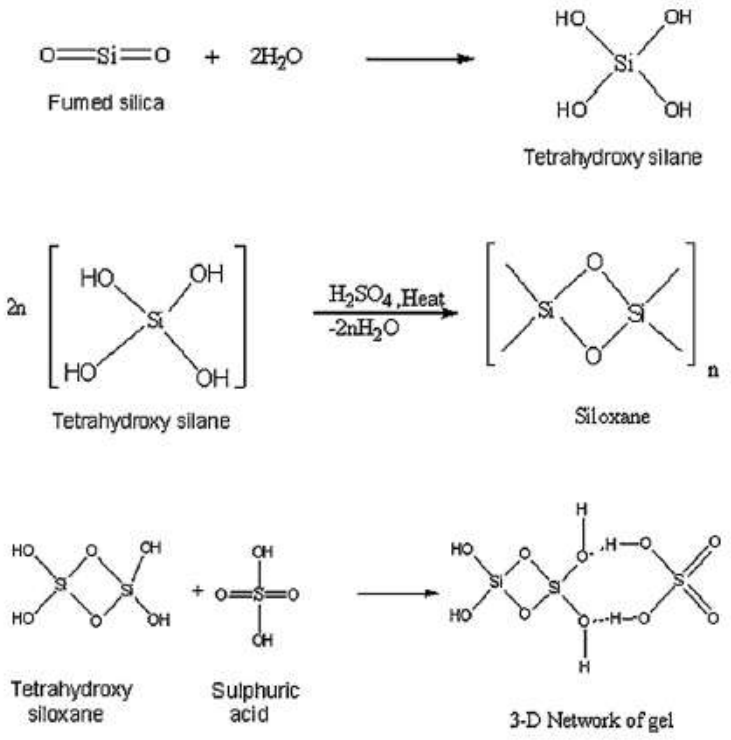


รูปที่ 2.13 การจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคของซิลิกา [23]

โครงสร้างของกลุ่มซิลิกาที่รวมตัวกันนี้ เมื่อถูกผสมเข้ากับน้ำและกรดจะสร้างพันธะไซโลเซน (Si – O – Si) ระหว่างอนุภาคซิลิกาที่แข็งแรง เกิดเป็นลักษณะของโซล (SOL) หรือเจลที่มีลักษณะเหลวคล้ายกับสารคอลลอยด์ เมื่อปล่อยให้แข็งตัวจะเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติด้วยแรงของพันธะของไฮโดรเจน ซึ่งเรียกโครงสร้างที่แข็งตัวนี้ว่าเจล (Gel) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งโครงสร้างของเจลสามารถผันกลับได้เมื่อมีแรงมากระทำกับเจล



รูปที่ 2.14 การสร้างโครงสร้างของเจลและการผันกลับของโครงสร้างเจลด้วยพันธะไซโลเซน [23]



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการสร้างเจล [24]

ดังนั้นสามารถสรุปขั้นตอนการเกิดเจลได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งโครงสร้างสามมิติของเจลมีส่วนสำคัญในการตรึงสารละลายกรดซัลฟิวริกและน้ำให้อยู่ในโครงสร้าง และในขั้นตอนการสร้างเจลจะพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดเจลอย่างมาก ตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส คืออัตราการเกิดเจลจะมากขึ้นเป็นสองเท่า ทุก ๆ การเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่ามีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อความเสถียรของเจล ได้แก่ ค่า pH ชนิดและความเข้มข้นของเกลือ รวมทั้งปริมาณและขนาดอนุภาคซิลิกา [4,23] โดยจะพบว่าการเกิดเจลจะเกิดขึ้นได้ดีในโครงข่ายสามมิติที่ขนาดอนุภาคมีขนาด 10 นาโนเมตร ดังนั้นขนาดอนุภาคของฟูมซิลิกาที่ 10 นาโนเมตร จะเป็นขนาดที่เหมาะสมในการสร้างเจล

2.4.1 **ผลของค่า** pH

ค่า pH มีผลต่อประจุบนพื้นผิวของซิลิกาและค่าศักย์ซีต้า ที่ค่า pH เท่ากับ 2 ค่าประจุบนพื้นผิวของซิลิกาจะเท่ากับ 0 และเมื่อเพิ่มค่า pH มากกว่า 2 พื้นผิวของซิลิกาจะมีประจุเป็นลบเนื่องบนพื้นผิวของซิลิกาจะมีกลุ่มของ –SiO- เกิดขึ้น แต่ที่ค่า pH ต่ำกว่า 2 จะพบว่าบนพื้นผิวของ

ซิลิกาจะมีประจุเป็นบวกซึ่งเป็นหมู่ของ $-SiOH_2^+$ ซึ่งเป็นผลมาจากการไอออไนเซชันของหมู่ซิลานอล (Si-OH) นอกจากนี้ในกรณีของกรดซัลฟิวริก (ค่า pH น้อยกว่าสอง) พบว่าโปรตอนยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างพันธะไซโลเซนด้วย [4]

2.4.2 ผลของชนิดและความเข้มข้นของเกลือ

การเติมเกลือที่มีความเข้มข้นสูงลงไปในอิเล็กโทรไลต์นั้นจะช่วยลดค่าศักย์ซีต้าและลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลของซิลิกา ซึ่งจะทำให้เกิดเจลได้ง่ายขึ้น โดยไอออนในระบบจะเป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคของซิลิกา เช่น ซัลเฟตไอออน โดยจะพบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตปริมาณ 1.0-2.5% โดยมวลลงในอิเล็กโทรไลต์ พบว่าสามารถช่วยให้แบตเตอรี่ฟื้นฟูสู่สภาพปกติหลังจากแบตเตอรี่คายประจุจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นในภาวะการคายประจุหมด โดยโซเดียมซัลเฟตจะเป็นตัวจำกัดการละลายของตะกั่วซัลเฟตในแบตเตอรี่ที่เรียกว่า ผลของปรากฏการณ์ไอออนร่วม (Common ion effect) [4]

2.4.3 ผลของชนิด ปริมาณและขนาดอนุภาคของซิลิกา

ชนิดของซิลิกาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์จำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ ซิลิกาออกไซด์ (water-glass) ฟูมซิลิกา (fumed silica) และคอลลอยด์ซิลิกา (colloidal silica) โดยชนิดของซิลิกาที่ใช้ในการสังเคราะห์มีผลโดยตรงต่อสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์และสมรรถภาพของแบตเตอรี่ [4]

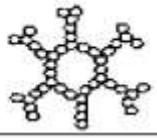
ซิลิกาออกไซด์สามารถสร้างเจลได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งลักษณะของเจลที่ได้จะมีลักษณะคล้ายพอลิเมอร์ (polymerized structure) คือเจลไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการแยกตัวของของเหลวออกจากเจล นอกจากนี้ซิลิกาออกไซด์ยังมีสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณมาก เช่น ไอออนของเหล็กและคลอไรด์ ดังนั้นซิลิกาชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

ฟูมซิลิกาเป็นชนิดของซิลิกาที่นิยมนำมาสังเคราะห์เจล ซึ่งมีข้อดีคือจะช่วยให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานนานขึ้น แต่การใช้ฟูมซิลิกาจะให้เวลาในการเกิดเจล (gelling time) ที่สั้น เจลที่ได้มีความหนืดสูง มีต้นทุนในการผลิตสูง และทำให้ความต้านทานภายในระบบของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น

เจลที่สังเคราะห์จากคอลลอยด์ซิลิกามีข้อดีคือเจลมีความเสถียรสูง มีความหนืดต่ำ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการแยกของของเหลวออกจากเจล และสามารถควบคุมเวลาในการเกิด

เจลได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เตรียมจากคอลลอยด์ซิลิกาจะให้รอบการใช้งานที่สั้นกว่าเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกา [4, 25]

ตารางที่ 2.5 ผลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อโครงสร้างเจล [4]

Coordination number	Schematic structure	Silica (vol.%)	Gel porosity (%)	Pore volume ($cm^3 g^{-1}$)
6		52	48	0.4
3		5	95	8.4
3, 2, 3		1.3	98.7	35
3, 2, 2, 3		0.83	99.2	54

คุณภาพของเจลที่ดีนั้น จำเป็นต้องมีปริมาตรช่องว่าง (pore volume) และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโครงสร้างเจลที่เหมาะสม โดยขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมเจลกล่าวคือ ถ้าใช้ซิลิกาปริมาณมากจะส่งผลให้ปริมาตรช่องว่างและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโครงสร้างเจลลดลง ผลของความเข้มข้นของซิลิกาต่อโครงสร้างเจลแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งควรจะใช้ปริมาณซิลิกาให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้มีช่องว่างให้มากที่สุด ในขณะเดียวกันก็ควรจะได้เจลที่มีความเสถียรด้วย เช่น อนุภาคซิลิกาขนาดใหญ่จะให้ช่องว่างขนาดใหญ่กว่าอนุภาคขนาดเล็ก แต่อนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อย จะส่งผลให้เจลมีความแข็งลดลง ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ขนาดและปริมาณของซิลิกาให้เหมาะสม [4]

ปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเจลแบตเตอรี่ นอกจากการสร้างเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงชนิด ปริมาณ และขนาดของซิลิกาแล้ว ยังมีผลของสารเติมแต่งบางตัวที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อีกด้วย เช่น โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และสารจำพวกพอลิเมอร์บางชนิด [26] เป็นต้น

2.5 สารเติมแต่งที่ใช้ในเจลอิเล็กโทรไลต์ (Additives)

2.5.1 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate)

โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate, Na_2SO_4) เป็นเกลือโซเดียมของกรดกำมะถัน เมื่อปราศจากน้ำจะมีลักษณะเป็นของแข็ง ผลึกสีขาว มักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย และที่สำคัญโซเดียมซัลเฟตเป็นสารเติมแต่งเป็นที่นิยมเติมลงไปในอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด โดยทั่วไปจะนิยมเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปในปริมาณร้อยละ 1 โดยมวล ซึ่งการเติมโซเดียมซัลเฟตนี้มีผลต่อปรากฏการณไอออนร่วม หรือที่เรียกว่า “Common ion effect” [27] คือ โซเดียมซัลเฟตสามารถช่วยป้องกันอันตรายจากการหมดไปของซัลเฟตไอออน ซึ่งมักจะเกิดขึ้นเมื่อเมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีการใช้ซัลเฟตไอออนไปในปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้ซัลเฟตไอออนในแบตเตอรี่หมดไป ดังนั้นการเติมโซเดียมซัลเฟตจึงยังทำให้มีซัลเฟตไอออนคงเหลืออยู่ในแบตเตอรี่ โดยจะไม่เพิ่มการกัดกร่อนของขั้ว [28] นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปในอิเล็กโทรดขั้วบวก จะทำให้ผลึกของธาตุขั้วบวกมีขนาดเล็กลงซึ่งจะทำให้อิเล็กโทรดขั้วบวกมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และการเติมโซเดียมซัลเฟตในแผ่นขั้วลบยังช่วยทำให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

อย่างไรก็ตามการเติมโซเดียมซัลเฟตมีข้อบกพร่องคือ แบตเตอรี่มีการคายประจุด้วยตัวเองที่มากกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่เติมโซเดียมซัลเฟต เนื่องจากซัลเฟตไอออนมีผลต่ออัตราการคายประจุด้วยตัวเอง โดยขั้นตอนการทำให้เกิดการคายประจุด้วยตัวเองที่สูงขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ในอิเล็กโทรไลต์รวมตัวกับโปรตอนได้ผลิตภัณฑ์เป็น HSO_4^- ดังสมการ 2.19

$$SO_4^{2-} + H^+ \Leftrightarrow HSO_4^- \qquad (2.19)$$

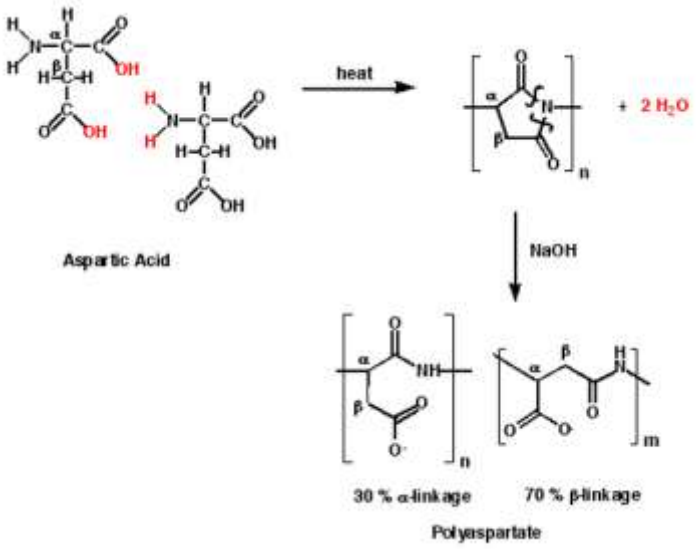
ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของ HSO_4^- สูงขึ้น ทำให้เกิดแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจน (oxygen and hydrogen evolution) และทำให้มีอัตราการคายประจุด้วยตัวเองสูงขึ้น รูปแบบที่สองซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) อาจทำปฏิกิริยากับไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) ในอิเล็กโทรไลต์ซึ่งจะเกิดเป็นตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) เป็นผลิตภัณฑ์และเกิดเป็นชั้นของตะกั่วซัลเฟตปกคลุมพื้นผิวของอิเล็กโทรด ทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาลดลง ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้เป็นสาเหตุให้แบตเตอรี่

มีอัตราการคายประจุด้วยตัวเอง นอกจากนี้การเกิดชั้นของตะกั่วซัลเฟตที่ผิวอิเล็กโทรดยังเป็นสาเหตุให้ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลดลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าลดลงด้วย [29]

2.5.2 **พอลิแอสพาร์เทต** (Polyaspartate)

พอลิแอสพาร์เทตเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ถูกสังเคราะห์จากกรดแอล-แอสพาร์ติค (L-aspartic acid) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกลุ่มคาร์บอกซิเลต พอลิแอสพาร์เทตเป็นสารที่ไม่มีพิษและยังเป็นสารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น สารช่วยการกระจายตัว (dispersing agent) สารเคมีป้องกันในระบบต่างๆ (antiscalant) สารดูดซับ (superabsorber) สารที่เติมลงไปในน้ำเสีย (waste water additive) สารยับยั้งการกัดกร่อน (corrosion and scale inhibitor) และยังใช้ในการเกษตรด้วย ซึ่งจะถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมปุ๋ยของพืช นอกจากจะช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยแล้ว ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปุ๋ยมากเกินด้วย

นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้เป็นตัวช่วยสลายในกระบวนการสลายทางชีวภาพ (biodegradeable) [30] ซึ่งกระบวนการสลายทางชีวภาพนั้นเป็นผลมาจากการย่อยสลายของพอลิแอสพาร์เทตได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อธรรมชาติ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งมักมีการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียและการฝังกลบ และที่สำคัญพอลิแอสพาร์เทตเป็นสารที่สามารถประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ เช่น ใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านแบบจำเพาะ (selective membrane) หรือเยื่อแลกผ่านที่มีความไวต่อค่า pH (pH-sensitive transmembrane) [31] เป็นต้น



รูปที่ 2.16 การสังเคราะห์พอลิแอสพาร์เทต [30]

กระบวนการสังเคราะห์พอลิแอสพาร์เทตแสดงดังรูป 2.16 ขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิแอสพาร์เทตในขั้นแรกจะให้ความร้อนกับกรดแอสพาร์ติกที่อุณหภูมิ 180°C เพื่อให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันได้พอลิซักซินิไมด์ (polysuccinimide) และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้อุณหภูมิที่ใช้ต่ำลงและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ซึ่งผลผลิตของพอลิซักซินิไมด์ที่ได้จะประมาณ 97% ในขั้นที่สองเป็นกระบวนการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 °C เพื่อเปิดวงแหวนของพอลิซักซินิไมด์ เนื่องจากการเปิดวงแหวนของพอลิซักซินิไมด์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี 2 รูปแบบ เป็น α-linkage และ β-linkage

2.6 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า

เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า เป็นการนำหลักการทางเคมีไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณหรือความเข้มข้นของสารที่ต้องการ โดยวิธีวิเคราะห์จะเกี่ยวข้องกับการวัดการตอบสนองทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารนั้น ในการทำเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า ต้องประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญอย่างน้อยที่สุด 3 ส่วน คือ ส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่สามารถนำกระแสได้ ส่วนของขั้วไฟฟ้า (electrode) ซึ่งเป็นตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์การวัดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และส่วนสุดท้ายคืออุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า [32]

ลักษณะเฉพาะของเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า ซึ่งทำให้แตกต่างจากเคมีวิเคราะห์ธรรมดา คือ สามารถใช้วิธีการทางไฟฟ้าในการควบคุมขอบข่ายและทิศทางการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ นอกจากนี้ เคมีไฟฟ้าวิเคราะห์ยังแตกต่างจากเคมีไฟฟ้าธรรมดาตรงที่หลักการเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในเชิงวิเคราะห์เกี่ยวข้องกับกระบวนที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสิ้น และสัญญาณไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องมักอยู่ในระดับที่ต่ำมาก โดยถ้าเป็นกระแสมักจะไม่เกิน 2-3 มิลลิโวลต์ ถ้าเป็นศักย์ไฟฟ้ามักไม่เกิน 2 โวลต์ เป็นต้น

เทคนิคของการวิเคราะห์โดยหลักการทางเคมีไฟฟ้า เป็นการให้สัญญาณไฟฟ้าหนึ่งๆ แก่สารตัวอย่าง แล้ววัดค่าพารามิเตอร์อื่นทางไฟฟ้าของสารละลายที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้น การให้สัญญาณทางไฟฟ้าและการวัดค่าทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เกิดเป็นเทคนิควิธีวิเคราะห์ที่มีชื่อแตกต่างกันออกไป ดังสรุปในตารางที่ 2.6 โดยชื่อของเทคนิควิธีการวิเคราะห์มักถูกเรียกตามค่าทางไฟฟ้าที่ถูกวัด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณหรือความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์นั้น ถ้าวัดศักย์ไฟฟ้า เรียกเทคนิควิเคราะห์นั้นว่า โพเทนซิโอเมทรี ถ้าวัดกระแสเรียกเทคนิควิเคราะห์นั้นว่า แอมแปโรเมทรี เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีโวลแทมเมทรี

ตารางที่ 2.6 เทคนิควิธีการทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า [32]

เทคนิควิธี	สัญญาณไฟฟ้าที่ให้	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัด
โพเทนซิออเมทรี	กระแส = 0	ศักย์
แอมแปโรเมทรี	ศักย์คงที่	กระแส
โวลแทมเมทรี	ศักย์	กระแส
คูลอมเมทรี	กระแสหรือศักย์	ปริมาณไฟฟ้า
อิเล็กโตรแกรวิเมทรี	กระแสหรือศักย์	น้ำหนักของสาร

2.6.1 **หลักการของโวลแทมเมทรี**

โวลแทมเมทรี (voltammetry) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมศักย์ไฟฟ้า ต้องให้ศักย์ที่คงที่เข้าไปในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าทำงานของเซลล์เคมีไฟฟ้าเทียบกับศักย์ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยทำการวัดกระแสของเซลล์เคมีไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไปตามความต่างศักย์ภายนอกที่ให้เข้าไป (รู้ได้โดยวัดศักย์ของขั้วนั้นเทียบกับขั้ว

อ้างอิง) การที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงศักย์จะทำให้สารเคมีในสารละลายของเซลล์สามารถมารับ (หรือมาให้) อิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดเป็นสปีชีส์ใหม่ นั่นคือเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือ electron transfer reaction อิเล็กตรอนข้างต้นจะไหลผ่านวงจรไฟฟ้าและไปเกิดคู่ปฏิกิริยาตรงข้ามที่อีกขั้วหนึ่ง ดังนั้นจึงวัดออกมาเป็นกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ได้มาเขียนกราฟ โดยให้กระแสเป็นแกน y และความต่างศักย์เป็นแกน x เรียกกราฟนี้ว่า โวลแทมโมแกรม (voltammogram) หรือ โพลาโรแกรม (polarogram)

จากกฎของฟาราเดย์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า พบว่าถ้ามีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและมีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้น จะหมายถึงมีกระแสไฟฟ้าไหลในเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ศึกษา และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผันตามกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ที่ควบคุม [33]

2.6.2 **อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำโวลแทมเมทรี** [34]

โดยทั่วไปการทำการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าจะใช้เซลล์ไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode, RE) และขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode, CE) โดยอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำโวลแทมเมทรีประกอบด้วย

1. เซลล์โวลแทมเมทรี (voltammetry cell) สำหรับบรรจุสารตัวอย่างและประกอบขั้วไฟฟ้า
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode, RE) ซึ่งที่นิยมใช้ในเทคนิคโวลแทมเมทรี ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล (Hg_2Cl_2) และขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl)
3. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode, WE) เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าจากวงจรอิเลคทรอนิคส์ภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าที่ให้นี้ทำให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานมีศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้สารบางชนิดที่อยู่ในสารละลายรอบขั้วไฟฟ้าใช้งาน สามารถเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอน (electron transfer reaction) บนผิวของขั้วไฟฟ้าได้ นั่นคือมีการให้หรือรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าใช้งาน กระแสที่เกิดขึ้นนี้จะถูกตรวจวัดโดยวงจรอิเลคทรอนิคส์ภายนอก
4. ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode, CE) ทำหน้าที่เป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับ

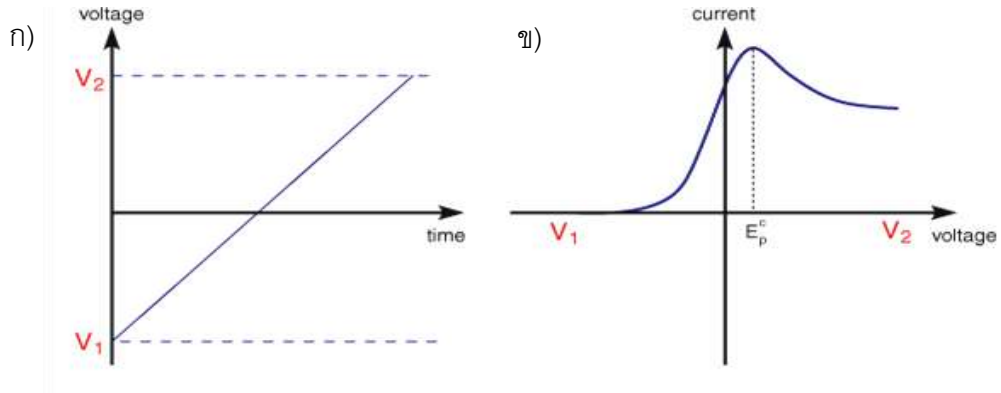
สารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ ขั้วไฟฟ้าช่วยที่นิยมใช้คือขั้วไฟฟ้าช่วยแพลตินัม (platinum wire counter electrode)

5. โวลแทมเมตริกอะนาไลเซอร์ (voltammetric analyzer) สำหรับควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้า

2.6.3 เทคนิควิเคราะห์ที่สำคัญในกลุ่มโวลแทมเมทรี

2.6.3.1 ลิเนียร์-สแกน โวลแทมเมทรี (linear scan voltammetry, LSV)

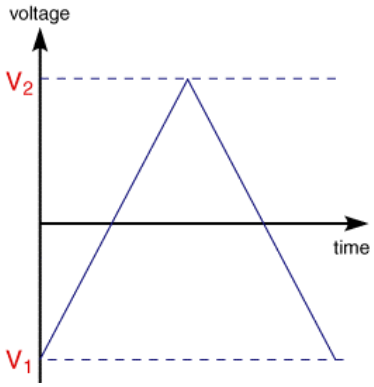
การวิเคราะห์แบบ linear scan voltammetry (LSV) คือการควบคุมศักย์ไฟฟ้าของวงจรให้เปลี่ยนแปลงจากศักย์ค่าหนึ่ง (V_1) ไปยังศักย์อีกค่าหนึ่ง (V_2) ในอัตราเร็ว (scan rate) ที่คงที่หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มหรือลดศักย์อย่างเป็นเส้นตรงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ก) โดยกระแสที่วัดได้จากการเปลี่ยนความต่างศักย์จากช่วงดังกล่าวสามารถแสดงดังรูปที่ 2.17 ข)



รูปที่ 2.17 โพลาโรกราฟีแบบเส้นตรง [34]

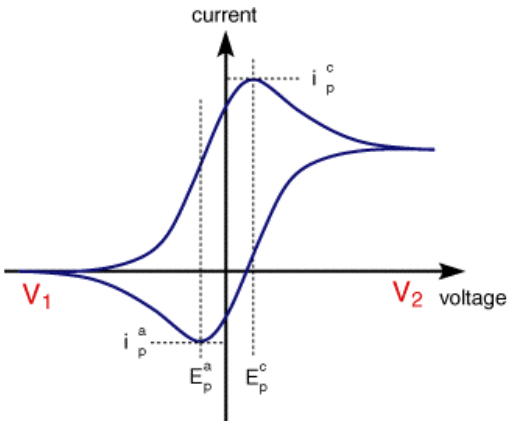
2.6.3.2 ไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry, CV)

ไซคลิกโวลแทมเมทรีมีความคล้ายกับวิธีการ LSV แต่จะทำการสแกนในลักษณะไป-กลับด้วยอัตราคงที่ โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าจาก V_1 ไปยัง V_2 ในการสแกนไปข้างหน้า และจาก V_2 สู่ V_1 อีกครั้งเมื่อทำการสแกนกลับ และสามารถสแกนได้หลายรอบตามที่ต้องการศึกษาดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 สัญญาณความต่างศักย์ที่ให้กับไซคลิกโวลแทมเมทรี [34]

เมื่อทำการสแกนไปข้างหน้าพบว่ากราฟมีลักษณะเช่นเดียวกับผลของ LSV เมื่อสแกนย้อนกลับผ่านตำแหน่งสมดุลจะได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส พบว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลจากสารละลายไปยังอิเล็กโทรด และเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้าม แต่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกันสำหรับปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่ผันกลับได้ ผลจากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี แสดงดังรูปที่ 2.19

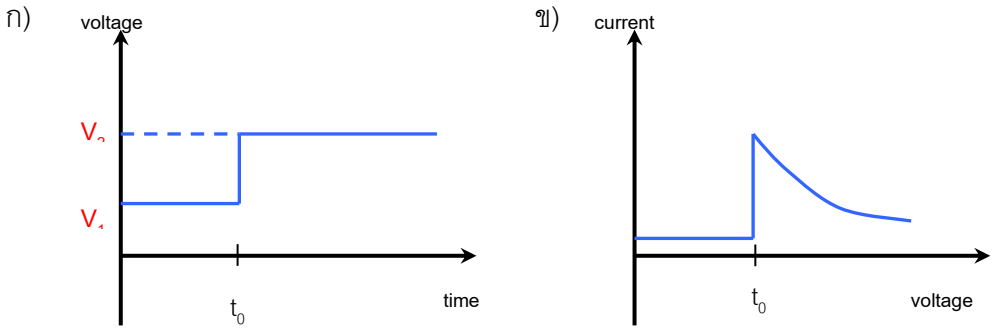


รูปที่ 2.19 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม [34]

2.6.3.3 **แอมแปโรเมทรี** (Amperometry)

เทคนิคแอมแปโรเมทรี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยให้ศักย์คงที่แก่ขั้วไฟฟ้าใช้งานตลอดการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ก) โดยค่าศักย์ที่ให้แก่วงจรนั้น ต้องมีค่าที่เพียงพอ ที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดย

เทคนิคแอมแปโรเมทรี แสดงได้ดังรูปที่ 2.20 ข) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป ($t > t_0$) กระแสจะลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง หรืออาจไม่มีสารตั้งต้นเหลืออยู่เลยก็เป็นได้

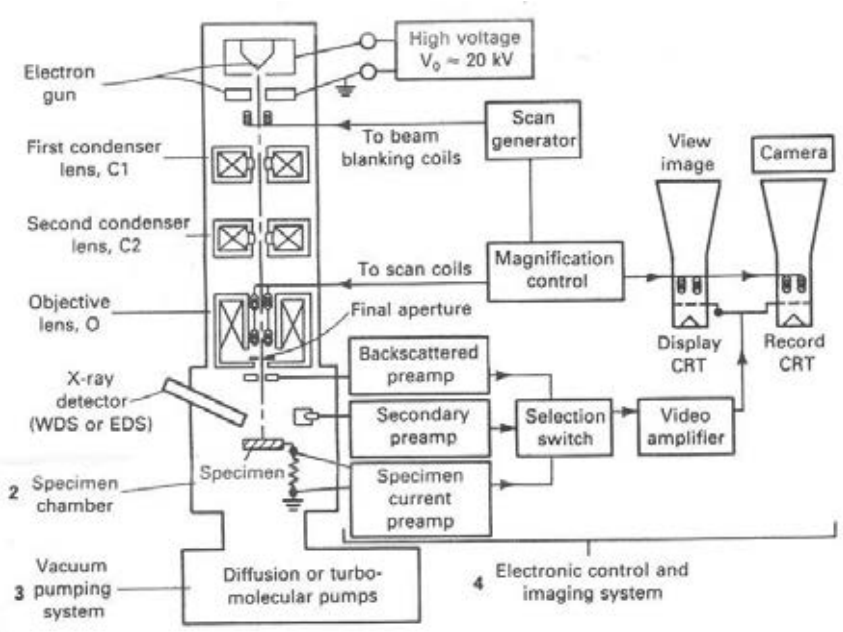


รูปที่ 2.20 สัญญาณแอมแปโรเมทรี [34]

2.7 **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด** (Scanning electron microscopy, SEM)

หลักการทำงานของ SEM [35] แสดงดังรูปที่ 2.21 โดยจะปล่อยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงออกมา ซึ่งสามารถควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าโฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงานตัวอย่าง และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างชิ้นงานตัวอย่างกับอิเล็กตรอน (interaction) ซึ่งจะก่อให้เกิดสัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (secondary electron) สัญญาณจากอิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (bacscattered electron) หรือ x-ray

สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับโดยเครื่องตรวจจับ (detector) และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพในที่สุด ซึ่งจะบอกลักษณะทางสัณฐานภายนอก (external morphology) ส่วนประกอบทางเคมี และโครงสร้างความเป็นผลึก ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพสามมิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น ในการนำไปใช้งานต่างๆ ข้อมูลจะถูกนำมาแสดงเป็นรูปภาพซึ่งจะมีขนาดประมาณ 1 เซนติเมตรถึง 5 ไมครอน และมีกำลังขยายตั้งแต่ 20 ถึง 30,000 เท่า และสามารถใช้เจาะจงพื้นที่ให้การวิเคราะห์ได้ ซึ่งจะมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ตัวอย่างในเชิงคุณภาพเพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ BSE (backscattered electrons) และวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของผลึกโดยใช้ EBSD (diffracted backscattered electrons)



รูปที่ 2.21 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [36]

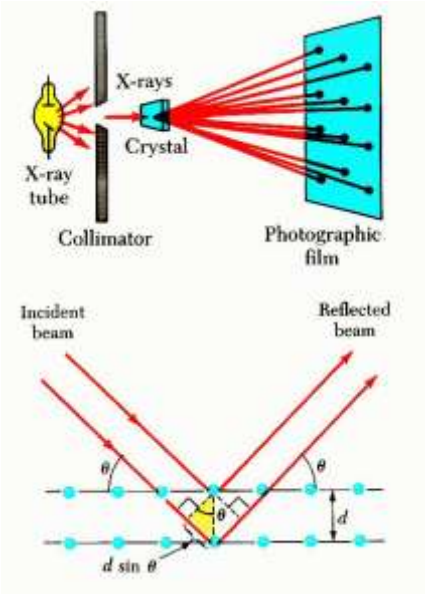
2.8 **เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์** (X-ray diffraction, XRD) [37, 38]

เทคนิค XRD มีหลักการอย่างง่ายคือนำรังสีเอ็กซ์มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียด เกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างโดยจะยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีเครื่องตรวจจับ (detector) เป็นตัวรับข้อมูล ในส่วนขององศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในชิ้นงานตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งหลักการ XRD แสดงดังรูปที่ 2.22

ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ (Theta) รังสีเอ็กซ์บางบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ(เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ (Theta) เท่ากับมุมตกกระทบ ซึ่ง ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปสมการซึ่งสมการดังกล่าวเรียกว่า " Bragg 's Law”

$$2d \sin \theta = n\lambda \qquad (2.20)$$

โดย d เป็นระยะระหว่างระนาบผลึก, θ เป็นมุมของการเลี้ยวเบน, n เป็นลำดับการแทรกสอด และ λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.22 หลักการของเครื่อง X-ray diffraction [38]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Martha และคณะ [19] ศึกษาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่มีเจลเป็นอิเล็กโทรไลต์ (gelled-electrolyte VRLA battery) เปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นดูดซึมใยแก้วเป็นแผ่นกั้น (AGM–VRLA battery) และแบตเตอรี่แบบเปียกที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลว (flooded-electrolyte lead-acid battery) พบว่าประสิทธิภาพของ gel VRLA แบตเตอรี่ จะมีค่าใกล้เคียงกับแบตเตอรี่อีกสองชนิดที่อุณหภูมิการใช้งานที่สูงกว่า 0°C โดยประสิทธิภาพของ gel VRLA แบตเตอรี่ จะมีค่าสูงกว่าแบตเตอรี่อีกสองชนิดที่ช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่ 0°C ถึง – 40°C ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของเจลที่เป็นของแข็งและสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำๆ เพราะอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวจะเกิดการแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิการใช้งานมีอุณหภูมิต่ำ

Lam และคณะ [3] ศึกษาการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลวภายใต้การดำเนินงานแบบการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูง (High rate partial state-of-charge, HRPSoC) พบว่าการสะสมของตะกั่วซัลเฟตที่ผิวหน้าของแผ่นขั้วลบ ทำให้แบตเตอรี่เกิดความล้มเหลว เนื่องจากในขั้นตอนการคายประจุที่อัตราการคายประจุสูงจะทำให้เกิดตะกั่วซัลเฟตเป็นกลุ่มหนาแน่นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นขั้วลบ และเมื่อมีการอัดประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ ตะกั่วซัลเฟตไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพในการอัดประจุลดลง และค่าความจุของแบตเตอรี่ลดลง อายุการใช้งานจึงสั้นลง

Park และคณะ [39] ศึกษาหาองค์ประกอบที่เหมาะสมของซิลิกาขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร กรดซัลฟิวริก อุณหภูมิ และปริมาณพอลิแอคริลาไมด์ที่เหมาะสมต่อความแข็งของเจล (gel strength) และอัตราในการเกิดเจล (gelation time) ใช้สารแขวนลอยที่มีซิลิกาในช่วง 2-15% w/v ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 15 และ 38% w/v โดยวัดค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus) พบว่ายิ่งค่าโมดูลัสสะสมมีค่ามากเจลก็จะมีความแข็งมากและที่ปริมาณของซิลิกาที่มากขึ้น กรดซัลฟิวริก 38% w/v จะทำให้เจลแข็งมากกว่ากรดซัลฟิวริก15 %w/v แต่ในขณะเดียวกันยิ่งปริมาณของซิลิกาที่มากขึ้นเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลมากขึ้นด้วย กรดซัลฟิวริก 38 % w/v จะแข็งตัวเร็วที่อุณหภูมิสูง ส่วนกรดซัลฟิวริก 15% w/v จะแข็งตัวได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำ โดยปริมาณพอลิแอคริลาไมด์มากเจลจะแข็งมากแต่เวลาที่ใช้ในการเกิดเจลก็สูงขึ้นด้วย โดยการทดสอบเจลดังกล่าวจะไม่ได้นำเอาเจลที่ศึกษาบรรจุลงในแบตเตอรี่

Petkova และคณะ [5] ศึกษาผลของสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต (Polyaspartate, PASP) ที่ส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของผลึกตะกั่วซัลเฟต โดยทดสอบการเกิดผลึกของตะกั่วซัลเฟตในสารละลายกรดซัลฟิวริกและตะกั่วไนเตรตเทียบกับการเกิดผลึกของตะกั่วซัลเฟตในสารละลายกรดซัลฟิวริกและตะกั่วไนเตรตที่เติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต 0.1% wt พบว่าผลึกของตะกั่วซัลเฟต ในสารละลายที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีขนาดเล็กกว่าและเกิดผลึกได้ช้ากว่า นอกจากนี้ยังได้ทดสอบค่าความจุในการคายประจุของแผ่นขั้วลบในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลวภายใต้การดำเนินงานแบบการคายประจุหมด (100% depth of discharge, 100%DOD) และการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูง (High rate partial state-of-charge, HRPSoC) พบว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และแผ่นขั้วลบจะให้ค่าการคายประจุของแผ่นขั้วลบที่สูงขึ้น อายุการใช้งานนานขึ้น และผลึกของตะกั่วซัลเฟตมีขนาดเล็กลง เมื่อเทียบกับแผ่นขั้วลบที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต

Karimi และคณะ [28] ศึกษาผลของการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ในปริมาณที่แตกต่างกัน และทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบเปียก ซึ่งมีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว พบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตในปริมาณร้อยละ 0.1 โดยมวล (โดยคิดจากน้ำหนักของ PbO_2) จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยสามารถเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้น (initial capacity) 3% และเพิ่มอายุการใช้งานได้ 18% นอกจากนี้ยังเพิ่มความจุไฟฟ้าเมื่ออายุการใช้งานสุดท้าย 12% และประสิทธิภาพในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้น 17% ซึ่งจะเห็นว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่จะช่วยให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

Hernández และคณะ [25] ศึกษาสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยศึกษาอัตราส่วน ชนิด และขนาดของซิลิกาทั้งในรูปของฟูมซิลิกาและสารแขวนลอย เพื่อตรวจสอบหาสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะต่อการนำไปใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม เปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลว พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาพเจลจะให้ค่าความจุประจุน้อยกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลวเพียงเล็กน้อย แต่ให้จำนวนรอบอายุการใช้งานมากกว่าแบบของเหลวมาก

Tang และคณะ [40] ศึกษาการใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพอลิไซโลเซน เพื่อใช้เป็นเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมที่มีขั้วบวกเป็นแบบหลอด โดยศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพอลิไซโลเซน (polysiloxane-base gel electrolyte, PBGE) เปรียบเทียบกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา (fumed-silica gel electrolyte, FSGE) พบว่า PBGE มีความเสถียรมากกว่า FSGE และการตรวจสอบสมบัติของแผ่นกั้นใน PBGE เปรียบเทียบกับแผ่นกั้นใน FSGE พบว่าแบตเตอรี่ชนิด PBGE สามารถให้ค่าความจุการคายประจุในการนำไปใช้งานได้สูงกว่า และมีสมรรถนะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำที่ดีกว่าแบตเตอรี่ชนิด FSGE ซึ่งความสามารถทางเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้นนี้เป็นผลมาจากประสิทธิภาพการถ่ายโอนประจุที่สูงขึ้นและเนื่องจากรูปแบบเปิดของโครงสร้างสามมิติของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพอลิไซโลเซน ซึ่งผลการตรวจสอบโดย SEM และ XRD พบว่า PBGE สามารถแปลงมวลว่องไว (Active-mass) ไปเป็น PbO_2 ได้ง่ายขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพในการสร้างตัวของเจลสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการนำ PBGE มาใช้จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุแผ่นธาตุบวก (Positive active material, PAM) ซึ่งช่วยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สูงขึ้นและลดต้นทุนการผลิตลงอีกด้วย

Chen และคณะ [41] ศึกษาผลของภาวะการเตรียมเจลและการกระจายตัวของอนุภาคฟูมซิลิกาในเจลแบตเตอรี่ โดยจะใช้ฟูมซิลิกาจากแหล่งผลิตที่ต่างกันและขนาดอนุภาคที่ต่างกัน โดยใช้ฟูมซิลิกาชนิด Aerosil 200 (A200) ขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร, Aerosil 150 (A150) ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร ซึ่งผลิตโดยบริษัท Degussa และ HL200 ขนาดอนุภาค 10 -20 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท GBS พบว่าอัตราการกวนเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ และเวลาในการกวนที่เหมาะสมจะขึ้นกับอุณหภูมิขณะเตรียมเจล โดยขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของซิลิกาจะส่งผลต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของเจล การอัตราการกวนเจลที่สูงจะช่วยปรับปรุงค่าความจุของขั้วอิเล็กโทรดให้สูงขึ้น และทำให้ความหนืดของเจลอิเล็กโทรไลต์ลดลง สำหรับการใช้ฟูมซิลิกาจากแหล่งผลิตที่ต่างกัน จะพบว่าฟูมซิลิกาขนาด 10 นาโนเมตรจะมีการเกาะกลุ่มกันได้ง่ายกว่าทำให้เกิดเจลได้ดีกว่าฟูมซิลิกาขนาด 20 นาโนเมตร

Yonglang และคณะ [42] ศึกษาการเกิดการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม พบว่าเมื่อใช้แบตเตอรี่ขนาดเดียวกันและจำนวนแผ่นธาตุที่เท่ากัน ค่าความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่มีเจลเป็นอิเล็กโทรไลต์ (gel VRLA batteries) มีค่าต่ำ

กว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่ใช้แผ่นดูดซึมใยแก้วเป็นแผ่นกั้น (AGM VRLA batteries) เนื่องจากมีสารอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่จำกัดกว่า ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่มีเจลเป็นอิเล็กโทรไลต์จึงควรมีการออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าและใช้อิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่มากกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอายุของแบตเตอรี่บนชั้นวาง (shelving) พบว่า gel VRLA แบตเตอรี่จะไม่เกิดการแยกชั้นของอิเล็กโทรไลต์และยังไม่เกิดซัลเฟชันบนแผ่นขั้วบวกด้วย ดังนั้นแผ่นขั้วบวกจึงไม่ถูกกัดกร่อนทำให้มีอายุบนชั้นวางที่นานขึ้น ส่วนที่แผ่นขั้วลบพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจน (hydrogen evolution) ของ gel VRLA แบตเตอรี่มีค่าลบมากกว่า AGM VRLA แบตเตอรี่ ดังนั้นอัตราการคายประจุด้วยตัวเองจึงช้ากว่า เมื่อพิจารณา gel VRLA แบตเตอรี่ที่มีอายุบนชั้นวางที่นานๆ จะพบว่าวัสดุว่องไวของแผ่นขั้วลบยังคงมีโครงสร้างของรูพรุนที่ดี แต่อาจมีผลึกของตะกั่วซัลเฟตขนาดใหญ่สะสมอยู่ที่ผิวของแผ่นขั้ว ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานและค่าความต่างศักย์เกินสูงขึ้น แต่ก็ไม่ค่อยส่งผลมากนักต่อค่าความจุของแบตเตอรี่ โดยสามารถลดค่าความต้านทานและค่าศักย์ไฟฟ้าเกินนี้โดยการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ในแบตเตอรี่ได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์และพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์ให้เหมาะสมต่อการใช้งานในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม ให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยมีเนื้อหา 4 ส่วน ในส่วนแรกเป็นส่วนของสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนที่สองแสดงวิธีการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ส่วนที่สามแสดงการทดสอบสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ และในส่วนสุดท้ายแสดงขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยมวล — QReC
2. ฟูมซิลิกา (ขนาดอนุภาค 12 nm) — Degussa
3. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) — Ajax Finechempty
4. พอลิแอสพาร์เทต

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตู้ดูดควัน (Hood)
2. ตู้ระบบปิด (Glove box)
3. เครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ช่วงความเร็ว 1,000 – 6,000 รอบต่อนาที บริษัท IKA® แสดงดังรูปที่ 3.1
4. ใบกวนที่ทำจากวัสดุที่ทนต่อกรดเข้มข้น (เทปลอน)
5. ขวดแก้วที่มีฝาปิดขนาด 300, 1,000 และ 2,000 มิลลิลิตร
6. ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
7. บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 250, 1,000 มิลลิลิตร

8. กระบอกตวงปริมาตร 100 และ 250 มิลลิลิตร
9. ไมโครปิเปตขนาด 20 – 200 ไมโครลิตร
10. เครื่องชั่งความละเอียด 2 และ 4 ตำแหน่ง
11. นาฬิกาจับเวลา
12. ถุงมือยาง
13. หน้ากากกันสารเคมีชนิดป้องกันพิเศษ
14. พาราฟิล์ม และกรรไกร
15. เทอร์โมมิเตอร์ ไฮโดรมิเตอร์ และมัลติมิเตอร์
16. หลอดหยด กระจกนาฬิกา และช้อนตักสาร
17. ภาชนะปิดสำหรับบรรจุฟูมซิลิกา
18. ชุดทดสอบระยะเวลาการเกิดเจล และหลอดทดลองขนาด 20 x 150 มิลลิลิตร
19. ลูกตะกั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร
20. แผ่นตะกั่วบริสุทธิ์ร้อยละ 98
21. ขั้วทองคำขาว (Pt) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl
22. ท่อหดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร
23. กระดาษทรายน้ำเบอร์ 800, 1500 และ 2000
24. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
25. แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบขนาด ขนาด 4 และ 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่

ก)

ข)

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ก) ภาชนะสำหรับเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ และ ข) เครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. Potentionstat/Galvanostat: Autolab Module PGSTA30 ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. เครื่องเติมน้ำกรดสุญญากาศ ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่
3. ชุดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถภาพแบตเตอรี่
    - เครื่อง UBA4 โดยโปรแกรม Universal battery analyzer Version 0.9.9.0A3 (Vencon Technologies Inc.)
    - เครื่อง Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 (Xin Ke Hua Industry Co.,Ltd)

3.2 การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์

1. เจือจางกรดซัลฟิวริกให้มีความเข้มข้น 1.325 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยใช้ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 หรือ 1,000 มิลลิลิตร รอให้เย็นลงแล้วตวงให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์
2. เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตปริมาณ 13.25 กรัมต่อลิตร ลงในกรดซัลฟิวริกที่เตรียมได้จากข้อ 1
3. เติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตลงในสารละลายที่ได้จากข้อ 2 ตามปริมาตรที่ต้องการ
4. ตักฟูมซิลิกาปริมาณตามที่ต้องการลงในขวดแก้วที่มีฝาปิดขนาด 1,000 หรือ 2,000 มิลลิลิตร
5. เติมสารละลายที่ได้จากข้อ 3 ลงในขวดที่มีฟูมซิลิกาในข้อ 4 จากนั้นนำไปกวนโดยใช้เครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ โดยใช้ความเร็ว 2,000 หรือ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
6. นำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้ในข้อ 5 ไปทดสอบต่อไป

3.3 การทดสอบสมบัติของอิเล็กโทรไลต์

การทดสอบสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ ทำการทดสอบทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีไฟฟ้า โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเจลนั้น จะทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อ

ระยะเวลาในการเกิดเจลและความแข็งของเจล และในส่วนของการทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของเจล จะทดสอบปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยใช้เทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรี

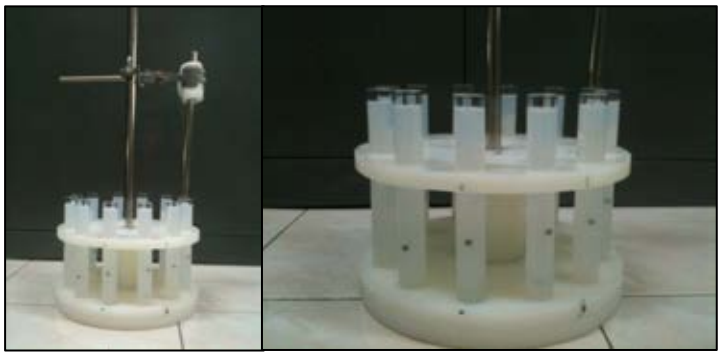
3.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเจลอิเล็กโทรไลต์

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเจลอิเล็กโทรไลต์ ศึกษาโดยการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลและความแข็งของเจล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการบรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ เมื่อเจลมีระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้น คือการเกิดเจลเกิดขึ้นเร็ว ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จะมีลักษณะที่หนืดกว่าเจลที่ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่นาน ซึ่งส่งผลให้กระบวนการบรรจุเจลลงในแบตเตอรี่นั้นทำได้ยากขึ้น ดังนั้น จึงมีการศึกษาหาระยะเวลาในการเกิดเจลที่เหมาะสมสำหรับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่จะบรรจุลงในแบตเตอรี่ สำหรับในงานวิจัยนี้ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล 3 ปัจจัย คือ ผลของปริมาณฟูมซิลิกา ผลของอัตราเร็วในการกวน และผลของปริมาณสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์

3.3.1.1 การศึกษาผลของปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวน

1. เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ตามขั้นตอน 3.2 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปริมาตรฟูมซิลิกา 15 กรัม (3%,w/v) อัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
2. นำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มาเทลงในหลอดทดลองขนาด 20 x 150 มิลลิลิตร ให้เจลอิเล็กโทรไลต์มีความสูง 14 เซนติเมตร
3. นำหลอดทดลองมาตั้งบนชุดทดสอบระยะเวลาการเกิดเจล แสดงดังรูปที่ 3.2
4. ทดสอบหาระยะเวลาในการเกิดเจล โดยการหย่อนลูกตะกั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ความสูงจากผิวหน้าของเจล 23 เซนติเมตร ทุกๆ 30 นาที จดบันทึกระยะทางที่ลูกตะกั่วสามารถเคลื่อนที่ได้ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
5. ทดสอบค่าความแข็งของเจล โดยการการหย่อนลูกตะกั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จดบันทึกระยะทางที่ลูกตะกั่วสามารถเคลื่อนที่ได้

6. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 5 แต่เปลี่ยนปริมาตรฟูมซิลิกาเป็น 20 กรัม (4%,w/v) และ 25 กรัม (5%,w/v) ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ทดสอบและลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจล

3.3.1.2 การศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต

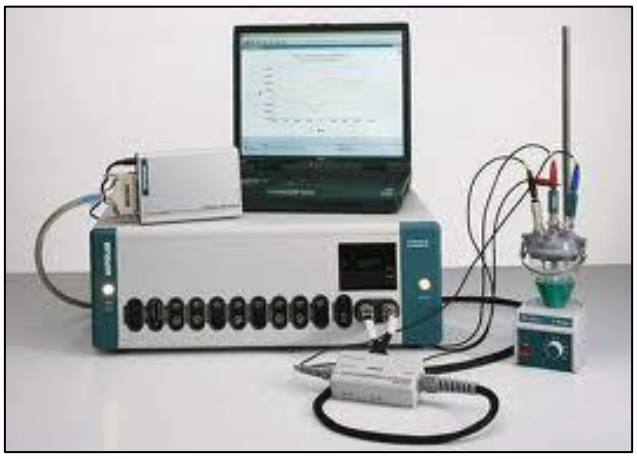
1. เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ตามขั้นตอน 3.3.1.1 โดยใช้ปริมาตรฟูมซิลิกา 20 กรัม (4%,w/v) สารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตปริมาตร 0.005% (w/v)
2. ทำการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลและค่าความแข็งของเจลเช่นเดียวกับ 3.3.1.1
3. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 2 แต่เปลี่ยนปริมาตรสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตเป็น 0.01% (w/v) และ 0.05% (w/v)

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

การทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีเป็นการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาของเจลเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาในอิเล็กโทรไลต์แบบเหลว โดยพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาหลักในอิเล็กโทรไลต์ และปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนภายในแบตเตอรี่นั้น หมายถึงการสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่ ระหว่างการอัดประจุเกินขนาดให้กับแบตเตอรี่ ดังนั้น หากปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊ส

ออกซิเจนเกิดขึ้นได้ง่ายและเร็ว ทำให้มีการสูญเสียน้ำในปริมาณมาก ส่งผลให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่สั้นลง และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง

การวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมเมทรีในงานวิจัยนี้ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว โดยใช้แผ่นตะกั่ว (Pb) เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode, WE) แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode, CE) และใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode,RE) โดยใช้เครื่อง Potentionstat/Galvanostat โปรแกรม Electrochemical Spectroscopy (GPES) ทำการสแกนในช่วงความต่างศักย์ –2.5 ถึง 3.0 โวลต์ ด้วยอัตรา 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยตัวอย่างเครื่อง Potentionstat/Galvanostat แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่อง Potentionstat/Galvanostat ทดสอบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว

3.3.2.1 การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์

1. เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ตามขั้นตอน 3.2 ในขวดปริมาตร 300 มิลลิลิตร ใช้กรดซัลฟิวริกปริมาตร 150 มิลลิลิตร โดยภาวะการเตรียมอิเล็กโทรไลต์แสดงในตารางที่ 3.1
2. ทิ้งเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในข้อ 1 ให้อยู่นิ่งเป็นระยะเวลา 5 วัน
3. นำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในข้อ 2 ทำการทดสอบในข้อ 3.3.2.3 ต่อไป

ตารางที่ 3.1 ภาวะของอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

สถานะ	อิเล็กโทรไลต์	องค์ประกอบ
เหลว	➢ สารละลายกรดซัลฟิวริก	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4
	➢ สารละลายกรดซัลฟิวริกเติมโซเดียมซัลเฟต	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4 and 13.25 g/L of Na_2SO_4
	➢ สารละลายกรดซัลฟิวริกเติมโซเดียมซัลเฟต และพอลิแอสพาร์เทต	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4, 13.25 g/L of Na_2SO_4 and 0.005% w/v of polyaspartate
เจล	➢ ไม่มีสารเติมแต่ง	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4, 13.25 g/L of Na_2SO_4 and difference amount of fumed silica at 2,000 and 4,000 stirring rates ➢ 3 %w/v of fumed silica ➢ 4 %w/v of fumed silica ➢ 5 %w/v of fumed silica
	➢ เติมพอลิแอสพาร์เทต	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4, 13.25 g/L of Na_2SO_4 and difference amount of polyaspartate at 2,000 and 4,000 stirring rates ➢ 4 %w/v of fumed silica - 0.005 %w/v of polyaspartate - 0.01 %w/v of polyaspartate - 0.05 %w/v of polyaspartate

3.3.2.2 การเตรียมขั้วทำงาน

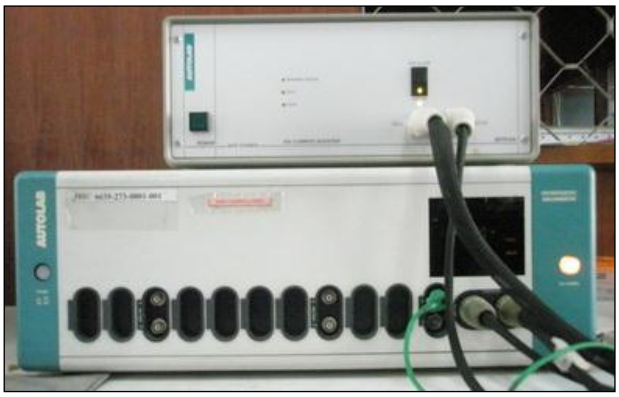
1. เตรียมขั้วทำงานโดยตัดแผ่นตะกั่วบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ให้มีขนาด 0.5 x 15 เซนติเมตร
2. เตรียมพื้นผิวขั้วทำงานโดยใช้กระดาษทรายน้ำเบอร์ 800, 1,500 และ 2,000 ขัดตามลำดับ
3. กำหนดพื้นที่ขั้วทำงานให้มีขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตร (0.5 x 1 เซนติเมตร) โดยคลุมด้วยท่อหดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร ตัดให้ยาว 1 เซนติเมตร แล้วคลุมขั้วทำงานให้ห่างจากปลายด้านหนึ่งเป็นระยะทาง 1 เซนติเมตร
4. เช็ดขั้วให้สะอาดแล้วนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

3.3.2.3 การวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

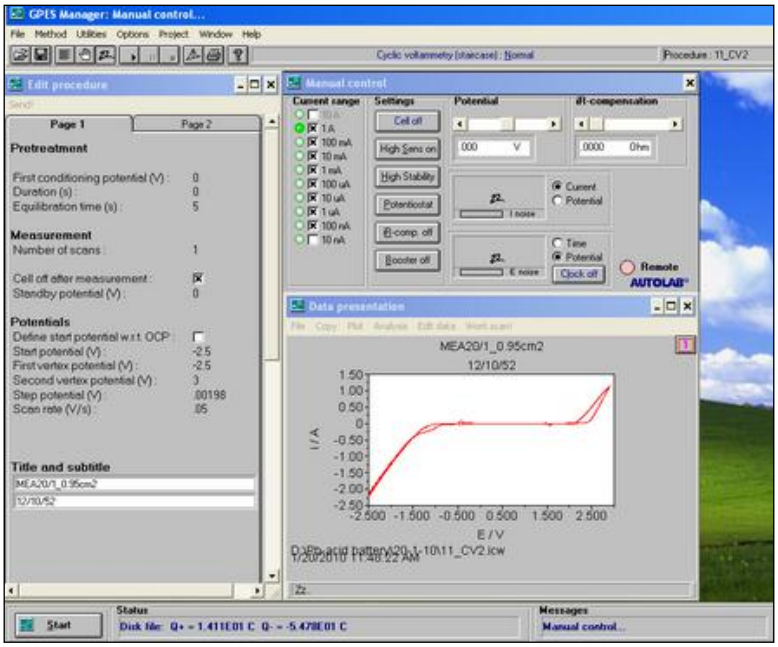
1. การวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีจะใช้เครื่อง Potentionstat/Galvanostat แสดงในรูปที่ 3.4 ทำการเปิดเครื่อง Potentionstat/ Galvanostat แล้วกดปุ่ม Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิดก่อนทำการวิเคราะห์
2. เปิดคอมพิวเตอร์ เลือกโปรแกรม GPES โดยหน้าต่างโปรแกรมแสดงในรูปที่ 3.5 เลือก Cyclic voltammetry (staircase) และเลือก Normal กำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง -2.5 ถึง 3.0 โวลต์ และค่า Scan rate ที่ 50 mV/sec
3. ต่อขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเข้ากับชุดทดสอบของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จัดตำแหน่งขั้วไฟฟ้าโดยให้ขั้วอ้างอิงอยู่ตรงกลาง โดยไม่ให้ขั้วแต่ละขั้วชนกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรได้
4. กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด จากนั้นกดปุ่ม Start ในหน้าต่างโปรแกรม เครื่องจะเริ่มทำงาน
5. บันทึกข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat
6. เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานให้กดปุ่ม Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด หากต้องการวิเคราะห์ต่อโดยเปลี่ยนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ให้เปลี่ยนขั้วทำงาน และล้าง

ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้สะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำซ้ำในข้อ 3 ถึง 5

7. เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองให้ปิด Cell Enable ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่อหยุดการทำงานของเซลล์
8. ปิดโปรแกรม GPES แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นปิดสวิตซ์ที่ตัวเครื่อง



รูปที่ 3.4 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTA30 ของบริษัท AUTOLAB



รูปที่ 3.5 หน้าต่างโปรแกรม GPES ของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat

3.4. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

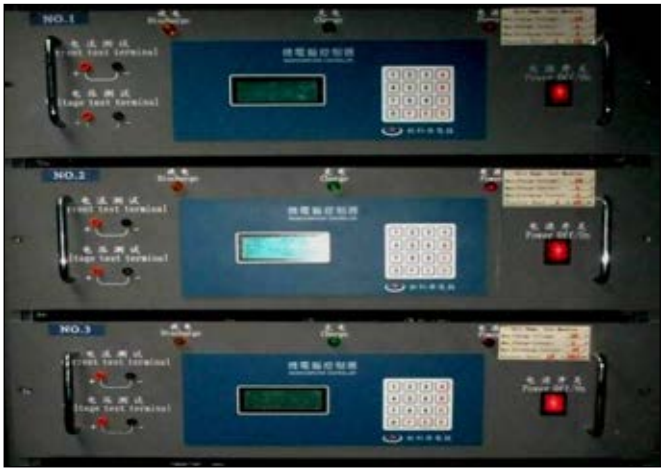
. ในงานวิจัยนี้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้จะถูกบรรจุลงในแบตเตอรี่ชนิดการใช้งานประจำที่ ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ และขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ โดยใช้เครื่องเติมน้ำกรดชนิดสุญญากาศ (ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่) จากนั้นแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ จะถูกนำไปประจุไฟฟ้าตามขั้นตอนของห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่ ก่อนที่จะนำไปทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ต่อไป โดยการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่จะแบ่งเป็นสองส่วน คือ การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจล และการทดสอบสมรรถนะการใช้งานของแบตเตอรี่ในภาวะต่างๆ โดยในส่วนแรกจะใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุมขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ในการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุหมด (100% DOD) โดยศึกษาการใช้งานที่อัตราการคายประจุต่ำ (Low-rate discharge, 0.1C) และการใช้งานที่อัตราการคายประจุสูง (High-rate discharge, 1C) เพื่อหาภาวะในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ คือ ปริมาณฟูมซิลิกา และอัตราเร็วในการกวนเจล ที่เหมาะสม โดยในส่วนที่สองของการทดสอบจะนำภาวะในการเตรียมเจลที่เหมาะสมไปศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตต่อการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ภาวะการใช้งานต่างๆ เช่น การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Cycle life) การทดสอบความสามารถการใช้งานที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม (patial state-of-charge) การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ และการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง (Self-discharge) โดยจะทดสอบในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุมขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ เนื่องจากเป็นขนาดของเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าในปัจจุบัน

3.4.1 การทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์

3.4.1.1 การทดสอบการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (Low-rate discharge, 0.1C) และอัตราการคายประจุสูง (High-rate discharge, 1C)

1. เปิดสวิตซ์เครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ (Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0) ดังแสดงในรูปที่ 3.6
2. เปิดสวิตซ์เครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

3. ต่อขั้วชุดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่เข้ากับแบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ โดยต่อขั้วบวกเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และต่อขั้วลบเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่
4. เปิดโปรแกรม XHKSN จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ แล้วเลือกเครื่องทดสอบที่ต้องการ
5. คลิกขวา เลือก Program Edit แล้วเขียนโปรแกรมสำหรับทดสอบแบตเตอรี่ จากนั้นบันทึกโปรแกรมที่เขียนไว้ โดยขั้นตอนการทดสอบการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) และอัตราการคายประจุสูง (1C) ดังแสดงในตารางที่ 3.2
6. คลิกขวาที่ช่องเครื่องที่ต้องการทดสอบ เลือก download แล้วเลือกโปรแกรมที่ต้องการทดสอบ (ตามที่เขียนไว้ในข้อ 5) จากนั้นกดปุ่ม Start (F3) เครื่องจะเริ่มทำงาน
7. เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ ทำการบันทึกข้อมูล โดยโปรแกรมจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ระยะเวลาต่างๆ ทั้งการอัดประจุและการค่ายประจุ และบอกค่าความจุของแบตเตอรี่ทั้งช่วงการอัดและคายประจุ
8. ปิดโปรแกรม XHKSN และปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วปิดเครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) และอัตราการคายประจุสูง (1C) [43]

ลำดับ	ขั้นตอน	
	อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C)	อัตราการคายประจุสูง (1C)
1	อัดประจุ (0.8 A/14.1 V/11 hr)	อัดประจุ (1 A/14.1 V/9 hr)
2	พัก (5 hr)	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (0.4 A/10.5 V)	คายประจุ (4 A/9.6 V)
4	อัดประจุ (0.8 A/14.1 V/11 hr)	อัดประจุ (1 A/14.1 V/9 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จำนวน 14 ครั้ง	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จำนวน 29 ครั้ง
6	พัก (5 hr)	พัก (5 hr)

หมายเหตุ

1. การอัดประจุลงในแบตเตอรี่และคายประจุออกทั้งหมด เรียกว่า การทดสอบ 1 รอบ
2. การอัดประจุ (0.8 A/14.1 V/11 hr) หมายถึง การอัดประจุใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.8 แอมแปร์ จนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 14.1 โวลต์ โดยกำหนดระยะเวลาในการอัดประจุ 11 ชั่วโมง
3. การคายประจุ (0.4 A/10.5 V) หมายถึง การคายประจุจะดึงกระแสไฟฟ้าขนาด 0.4 แอมแปร์ จนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงถึง 10.5 โวลต์ แล้วจึงหยุดการคายประจุ

3.4.2 การทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์

3.4.2.1 การทดสอบการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (Low-rate discharge, 0.1C) และอัตราการคายประจุสูง (High-rate discharge, 1C)

การทดสอบการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำและอัตราการคายประจุสูงของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์จะใช้ขั้นตอนการทดสอบตามข้อ 3.4.1.1 โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าในขั้นตอนการอัดและการคายประจุ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) และอัตราการคายประจุสูง (1C)

ลำดับ	ขั้นตอน	
	อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C)	อัตราการคายประจุสูง (1C)
1	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
2	พัก (5 hr)	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (0.7 A/10.5 V)	คายประจุ (7 A/9.6 V)
4	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จำนวน 14 ครั้ง	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จำนวน 29 ครั้ง
6	พัก (5 hr)	พัก (5 hr)

3.4.2.2 **การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง** (Self-discharge)

การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ โดยบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ จากนั้นทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทุกๆ 1 สัปดาห์ เป็นเวลา 12 สัปดาห์ โดยเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เป็นร้อยละความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จากนั้นนำแบตเตอรี่ที่คายประจุด้วยตัวเองครบ 12 สัปดาห์ ไปทดสอบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) โดยใช้เครื่อง Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version และใช้ขั้นตอนการทดสอบตามข้อ 3.4.1.1 โดยขั้นตอนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ [44]

Capacity	6V OCV	12V OCV
100%	V > 6.5V	V > 13.0V
90%	6.40 < V < 6.50	12.80 < V < 13.00
80%	6.33 < V < 6.40	12.65 < V < 12.80
70%	6.25 < V < 6.33	12.50 < V < 12.65
60%	6.18 < V < 6.25	12.35 < V < 12.50
50%	6.10 < V < 6.18	12.20 < V < 12.35
40%	6.03 < V < 6.10	12.05 < V < 12.20
30%	5.95 < V < 6.03	11.90 < V < 12.05
20%	5.88 < V < 5.95	11.75 < V < 11.90
10%	5.80 < V < 5.88	11.60 < V < 11.75

ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบการคายสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) หลังการคายประจุด้วยตัวเอง

ลำดับ	ขั้นตอน
1	คายประจุ (0.7 A/10.5 V)
2	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
3	ทำซ้ำลำดับที่ 1 ถึง 2 จำนวน 5 ครั้ง

3.4.2.3 **การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่** (Cycle life)

การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะใช้เครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ เครื่อง Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version โดยทดสอบการใช้งานแบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุสูง (1C) เป็นจำนวน 200 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับค่าความลึกของการคายประจุในแต่ละรอบ ซึ่งจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม จะมีอายุการใช้งานประมาณ 200 รอบ เมื่อค่าความลึกในการคายประจุคือ100 % หรือ 100% depth of discharge ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยขั้นตอนการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะใช้ขั้นตอนตามข้อ 3.4.1.1 โดยขั้นตอนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ขั้นตอนการทดสอบอายุการใช้งานสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุหมด (100% DOD) ที่อัตราการคายประจุสูง (1C)

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (7 A/9.6 V)
4	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จำนวน 199 ครั้ง
6	พัก (5 hr)

3.4.2.4 การทดสอบความสามารถการใช้งานที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม (patial state-of-charge)

การทดสอบความสามารถการใช้งานที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม (patial state-of-charge) ของแบตเตอรี่จะใช้ขั้นตอนการทดสอบตามข้อ 3.4.1.1 ซึ่งจะทำการทดสอบการคายประจุเมื่อมีการอัดประจุไม่เต็มที่ทั้งที่อัตราเร็วปกติและอัตราเร็วสูง โดยภาวะการอัดประจุไม่เต็มสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.2

โดยการทดสอบสมรรถนะการคายประจุภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วปกติ จะทำการทดสอบแบตเตอรี่ที่ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (0.1C) และมีภาวะการอัดประจุแบบไม่เต็ม โดยในการทดสอบหนึ่งครั้งนั้น จะประกอบไปด้วยกระบวนการการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่จนเต็มความจุของแบตเตอรี่ และทดสอบการคายประจุจนหมด (100% DoD) จำนวนหนึ่งรอบ จากนั้นจะอัดประจุกลับเข้าไปในแบตเตอรี่โดยการอัดประจุแบบไม่เต็มความจุของแบตเตอรี่ และทำการทดสอบการคายประจุจนหมด เป็นจำนวน 5 รอบ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งจะเป็นการทดสอบทั้งหมดจำนวน 36 รอบ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วปกติ [45]

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (0.7 A/14.1 V/24 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (0.7 A/10.8 V)
4	อัดประจุ (0.7 A/14.1 V/8 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จำนวน 5 ครั้ง
6	พัก (5 hr)
7	ทำซ้ำลำดับที่ 1 ถึง 6 จำนวน 5 ครั้ง

และการทดสอบสมรรถนะการคายประจุภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูงจะดำเนินการทดสอบแบตเตอรี่ที่ภาวะการคายประจุไม่หมดและการอัดประจุไม่เต็ม ซึ่งจะกำหนดค่ากระแสในการคายประจุและการอัดประจุที่คงที่ ที่ภาวะการคายประจุสูง (2C) และภาวะการอัดประจุสูง (2C) ซึ่งจะทำการทดสอบจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่จนแบตเตอรี่มีค่าความต่างศักย์สุดท้ายเป็น 10.5 โวลต์ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูงแบบกระแสคงที่ [24]

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (14 A/5 min)
4	อัดประจุ (14 A/5 min)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จนกระบวนการคายประจุมีค่าความต่างศักย์สุดท้ายเป็น 10.5 V
6	พัก (5 hr)

3.4.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ จะศึกษาที่อุณหภูมิ 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการทดสอบการคายประจุที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆ จะทดสอบตามขั้นตอนที่ 3.4.1.1 ซึ่งจะทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1C) เป็นจำนวน 5 รอบ ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ขั้นตอนการทดสอบการคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/7Ah) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ

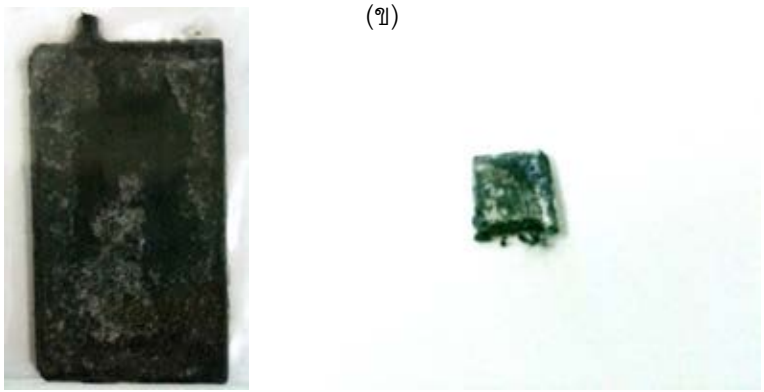
ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (0.7 A/10.5 V)
4	อัดประจุ (2 A/14.1 V/9 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 จำนวน 5 ครั้ง
6	พัก (5 hr)

3.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแผ่นขั้วลบ

3.5.1 การเตรียมแผ่นขั้วลบ

1. นำแบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบไปอัดระจุไฟฟ้าให้เต็ม แล้วผ่าหม้อแบตเตอรี่เพื่อนำแผ่นขั้วลบภายในไปทดสอบ
2. ทำการตัดแผ่นขั้วลบที่ได้ โดยตัดบริเวณด้านล่างของแผ่นขั้ว ให้มีขนาดเล็กประมาณ 1 x 1 เซนติเมตร
3. นำแผ่นขั้วที่ตัดได้ไปตากให้แห้ง เพื่อระเหยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ออกไปและป้องกันการกัดกร่อนเครื่องมือทดสอบ
4. นำแผ่นขั้วที่ได้ไปทดสอบ โดยลักษณะของแผ่นขั้วที่เตรียมได้แสดงได้ดังรูปที่ 3.7

(ก) (ข)



รูปที่ 3.7 ลักษณะของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม ก) ลักษณะแผ่นขั้วลบก่อนตัด ข) ลักษณะแผ่นขั้วลบหลังตัด

3.5.2 **วิธีการทดสอบสมบัติของแผ่นขั้วลบ**

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นขั้วลบจะศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) เครื่อง Joel scanning electron microscope รุ่น JSM 6400 และศึกษาสมบัติทางเคมีของแผ่นขั้วด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เครื่อง Bruker X-ray diffractometer D8-Discover จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื้อหาส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วยเนื้อหา 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตในอิเล็กโทรไลต์เหลว ส่วนที่สองเป็นการศึกษาภาวะการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ในส่วนที่สามจะเป็นการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในการใช้งานที่แตกต่างกัน และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบหลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

4.1 การศึกษาผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทต

การเติมโซเดียมซัลเฟตเป็นการเพิ่มซัลเฟตไอออนลงไปในอิเล็กโทรไลต์ โดยการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์ปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ให้สูงขึ้น ช่วยป้องกันการใช้หมดไปของซัลเฟตไอออน ซึ่งเป็นอันตรายเมื่อแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าโดยไม่มีกรด มักจะเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีการใช้ซัลเฟตไอออนไปในปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้ซัลเฟตไอออนในแบตเตอรี่หมดไป ดังนั้นการเติมโซเดียมซัลเฟตจึงยังทำให้มีซัลเฟตไอออนคงเหลืออยู่ในแบตเตอรี่ โดยจะไม่เพิ่มการกัดกร่อนของขั้ว [27] นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปในแผ่นขั้วบวก จะทำให้ผลึกของธาตุขั้วบวกมีขนาดเล็กลงซึ่งจะทำให้แผ่นขั้วบวกมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และการเติมโซเดียมซัลเฟตในแผ่นขั้วลบยังช่วยทำให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น [28]

การเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตลงอิเล็กโทรไลต์และแผ่นขั้วลบในแบตเตอรี่จะช่วยปรับปรุงขนาดของตะกั่วซัลเฟตให้เล็กลง ทำให้การละลายของตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นขั้วเกิดได้ง่ายขึ้น เมื่อมีการอัดประจุไฟฟ้าครั้งต่อไป ช่วยลดการสะสมของผลึกตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นขั้ว นอกจากนั้นยังช่วยให้กระบวนการเกิดผลึกตะกั่วซัลเฟตเกิดช้าลง เป็นผลดีต่อการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ ซึ่งจะเกิดในอัตราที่ช้าลง สามารถเก็บแบตเตอรี่ได้นานขึ้น และยังช่วยให้แบตเตอรี่มีค่าการคายประจุที่สูงขึ้น ทำให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น [5]

ในส่วนนี้จึงศึกษาการเติมโซเดียมซัลเฟตในปริมาณร้อยละ 1 (1% w/v) และศึกษาการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ปริมาณร้อยละ 0.005 (0.005% w/v) เปรียบเทียบกับอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง

4.1.1 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

การทดสอบอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นการศึกษาปฏิกิริยาโดยรวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ โดยเฉพาะปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและและออกซิเจน ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่มีการอัดประจุไฟฟ้ามากเกินและเป็นสาเหตุให้แบตเตอรี่มีสมรรถนะที่ต่ำลง ซึ่งในส่วนนี้จะศึกษาเปรียบเทียบอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นอิเล็กโทรไลต์เหลว 3 ชนิดด้วยกัน คือ อิเล็กโทรไลต์เหลวที่ไม่เติมสารเติมแต่ง อิเล็กโทรไลต์เหลวที่เติมโซเดียมซัลเฟตปริมาณร้อยละ 1 (1% w/v) และอิเล็กโทรไลต์เหลวที่เติมทั้งโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 1 (1% w/v) และพอลิแอสพาร์เทตร้อยละ 0.005 (0.005% w/v)

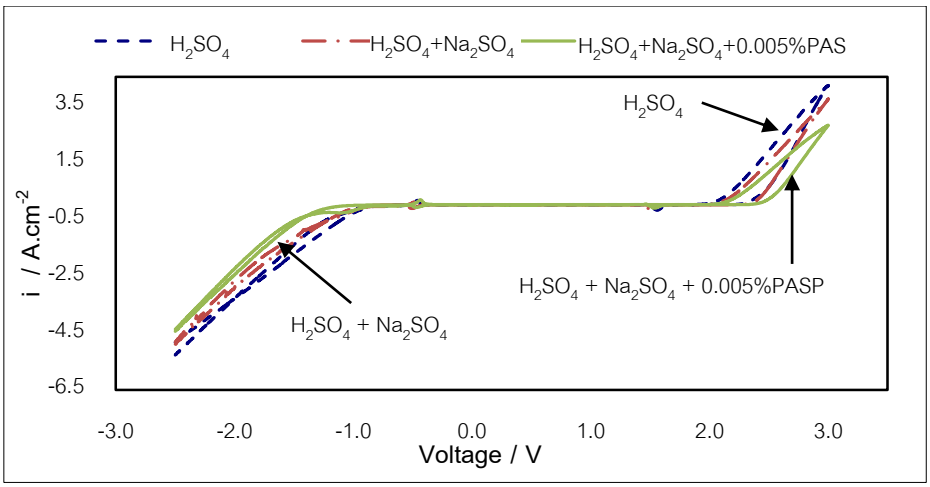
ผลการวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์เหลวด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีแสดงดังรูปที่ 4.1 ก) พบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ พิจารณาได้จากช่วงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของอิเล็กโทรไลต์เหลวที่เติมโซเดียมซัลเฟต และอิเล็กโทรไลต์เหลวที่เติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตให้พีกของการเกิดปฏิกิริยาตรงกับพีกการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลต์เหลวที่ไม่เติมสารเติมแต่ง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในรูปที่ 4.1 ข) และส่วนของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สออกซิเจนในรูปที่ 4.1 ค) พบว่าอิเล็กโทรไลต์ที่เติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตมีปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ยากกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่เติมโซเดียมซัลเฟต และอิเล็กโทรไลต์ที่เติมโซเดียมซัลเฟตมีปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ยากกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง พิจารณาได้จากช่วงค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะเลื่อนไปทางด้านซ้ายมือ หรือทางด้านที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่า และช่วงค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สออกซิเจนจะเลื่อนไปทางด้านขวามือ หรือทางด้านที่มีค่าความต่างศักย์สูงกว่า แสดงว่าปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดขึ้นได้ยากกว่า นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน พิจารณาจากค่าความสูงของค่าความหนาแน่นกระแส พบว่าอิเล็กโทรไลต์ที่เติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตมีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ต่ำกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่เติมโซเดียม

ซัลเฟต และอิเล็กโทรไลต์ที่เติมโซเดียมซัลเฟตมีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ต่ำกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง

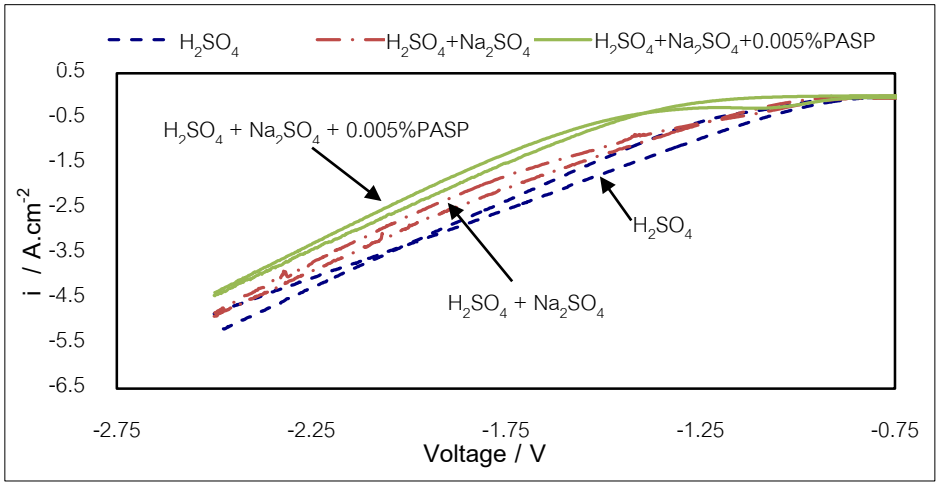
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตลงไปในอิเล็กโทรไลต์สามารถช่วยลดอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนได้มากกว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตน่าจะมีแนวโน้มในการช่วยลดการสูญเสียน้ำภายในแบตเตอรี่ได้ เนื่องจากการเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตส่งผลให้ผลึกตะกั่วซัลเฟตมีขนาดเล็กลง ส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาที่แผ่นขั้วเนื่องจากผลึกตะกั่วซัลเฟตจะไม่บดบังพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา ทำให้ยังคงมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่มาก ทำให้ปฏิกิริยาหลักในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดยังคงดำเนินต่อไป ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนจึงน้อยลง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาส่วนขยายของช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันดังแสดงในรูปที่ ข.1 พบว่าไม่มีพีกของปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นในอิเล็กโทรไลต์เหลวที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทต เปรียบเทียบกับอิเล็กโทรไลต์เหลวที่ไม่เติมสารเติมแต่ง โดยความสูงและตำแหน่งของพีกจะแตกต่างกันเล็กน้อยแบบไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งอาจจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเล็กน้อย แต่จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนจากการทดลองอาจมีผลมากกว่า ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้จะพิจารณาเพื่อยืนยันว่าการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอื่นนอกเหนือจากปฏิกิริยาหลักในการดำเนินงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

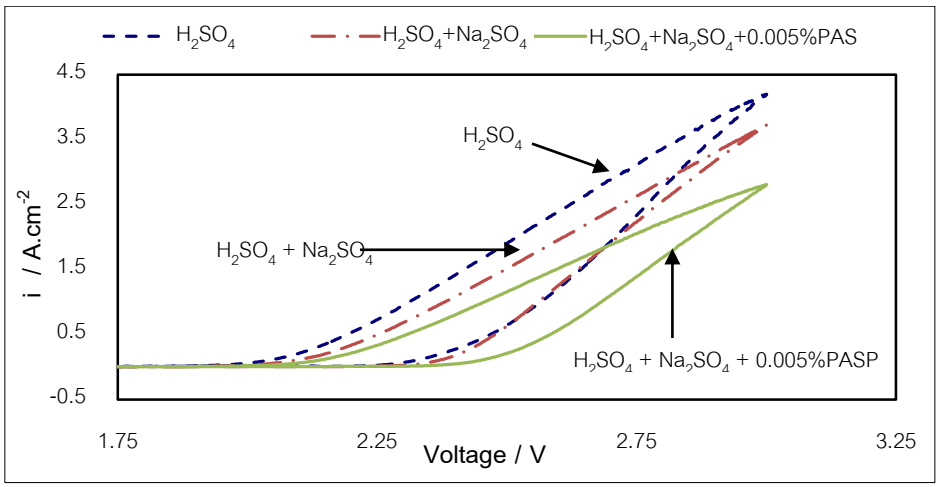
ก)



ข)



ค)



รูปที่ 4.1 กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เปรียบเทียบกรดซัลฟิวริกที่เติมสารเติมแต่งและไม่เติมสารเติมแต่งช่วง ก) -2.5 V ถึง 3.0 V ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

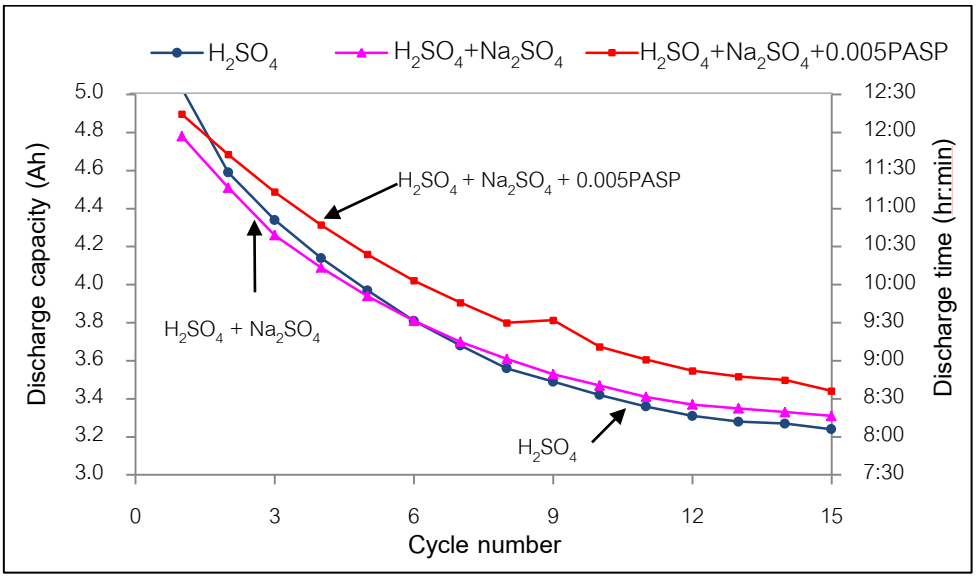
4.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

ผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว 3 ชนิด คือ แบตเตอรี่ที่เติมทั้งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทต แบตเตอรี่ที่เติมโซเดียมซัลเฟต และแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าแบตเตอรี่ทั้ง 3 ให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ลดลงเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบมากขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากความเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่เมื่อมีการใช้งานมากขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ทั้ง 3 พบว่าที่อัตราการคายประจุต่ำ (4.2 ก)) แบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์มีการเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทต ให้ค่าความจุในการคายประจุเฉลี่ยสูงที่สุด โดยให้ค่าความจุในการคายประจุเฉลี่ยสูงกว่าแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่งร้อยละ 5.04 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.63 แต่เมื่อพิจารณาแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์เติมโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว พบว่าให้ค่าความจุในการคายประจุเฉลี่ยใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่ง แต่จะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.44 และเมื่อพิจารณาที่อัตราการคายประจุสูง (4.2 ข)) แบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์มีการเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทต ให้ค่าความจุในการคายประจุเฉลี่ยสูงที่สุด โดยให้ค่าความจุในการคายประจุเฉลี่ยสูงกว่าแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่งร้อยละ 19.28 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.35 และเมื่อพิจาณาแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์เติมโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว พบว่าให้ค่าความจุในการคายประจุสูงกว่าแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่งร้อยละ 10.76 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.88 ซึ่งการทดลองจะให้ความสำคัญกับค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่เป็นหลัก

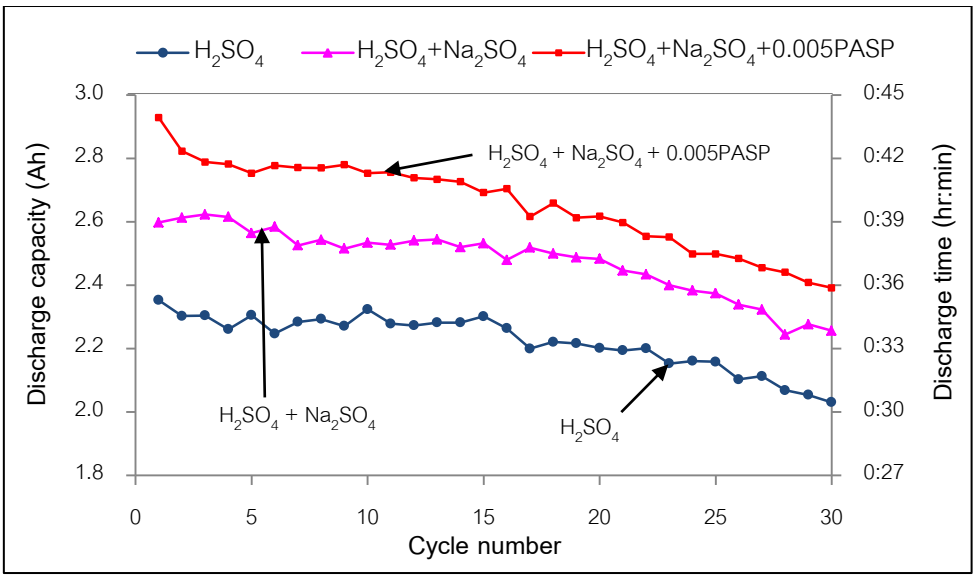
การเพิ่มขึ้นของค่าความจุในการคายประจุและประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์มีการเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตเป็นผลมาจาก 2 กรณี คือการที่แบตเตอรี่มีไอออนของ SO_4^{2-} มากขึ้น เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุหมด ดังนั้นการเติมโซเดียมซัลเฟตจะช่วยป้องกันการใช้หมดไปของ SO_4^{2-} เมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุจำนวนมาก และยังช่วยให้แบตเตอรี่มีการอัดประจุย้อนกลับดีขึ้น [27, 28] ซึ่งจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และการเติมพอลิแอสพาร์เทตในอิเล็กโทรไลต์จะช่วยให้ผลึกของตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นที่แผ่นขั้วของแบตเตอรี่เมื่อมีการคายประจุมีขนาดเล็กลง ซึ่งจะทำให้ผลึกของตะกั่วซัลเฟตไม่ไปบดบังพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา ทำให้แบตเตอรี่มีอัตราการคายประจุที่สูงขึ้น [3] นอกจากนี้เมื่อมีการอัดประจุย้อนกลับ การละลายของผลึกตะกั่วซัลเฟตที่มีขนาดเล็กจะทำได้ง่ายขึ้น [5] ซึ่งจะ

เห็นได้จากแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์เติมทั้งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความจุในการคายประจุและมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์เติมโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว

ก)



ข)



รูปที่ 4.2 สมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง แบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร และแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตรและพอลิแอสพาร์เทตร้อยละ 0.005 โดยมวล ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราการเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง

4.2 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์

เนื่องจากการเติมโซเดียมซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์ทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ดีขึ้นดังที่กล่าวข้างต้น ในส่วนการศึกษาการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์นี้จึงมีการเติมโซเดียมซัลเฟตปริมาณร้อยละ 1 (1% w/v) ลงไปในทุกสูตร ส่วนสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตนั้นจะทำการทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมต่อไป

ในส่วนนี้จะแสดงผลและวิเคราะห์ผลการทดลองของการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลในการเตรียมเจล คือ ปริมาณฟูมซิลิกา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต เพื่อหาภาวะการเตียมเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม โดยการแสดงผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการทดสอบสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์

4.2.1.1 ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล

เจลอิเล็กโทรไลต์นั้นเป็นเจลที่มีสมบัติแบบไทโซโทรปี (thixotropy) ซึ่งเจลที่เตรียมได้จะมีความหนืดและความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีแรงมากระทำกับเจล แต่เมื่อมีแรงมากระทำกับเจลเจลก็สามารถกลับมามีลักษณะคล้ายของเหลวได้อีกครั้งหนึ่ง [23] ดังนั้นการทดสอบระยะเวลาการเกิดเจลมีความสำคัญมาก โดยจะส่งผลต่อกระบวนการเติมเจลอิเล็กโทรไลต์ในการผลิตแบตเตอรี่ กล่าวคือหากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีระยะเวลาการเกิดเจลที่สั้นจะส่งผลให้กระบวนการเติมเจลนั้นทำได้ยาก เนื่องจากเจลจะมีความหนืดมากและความแข็งของเจลมาก เจลอาจเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะเติมเจลลงในแบตเตอรี่ได้หมด ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในแบตเตอรี่ทำให้แบตเตอรี่มีสมรรถนะที่ต่ำลง ในทางกลับกันหากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีระยะเวลาการเกิดเจลที่นานหรือมีการแข็งตัวที่ต่ำ แม้จะง่ายต่อกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่ แต่ก็ทำให้เจลแบตเตอรี่ที่ได้ยังคงมีน้ำกรดรั่วซึมอยู่ โดยระยะเวลาการเกิดเจลที่เหมาะสมสำหรับเจลแบตเตอรี่นั้นจะอยู่ในช่วง 3 – 4 ชั่วโมง [40]

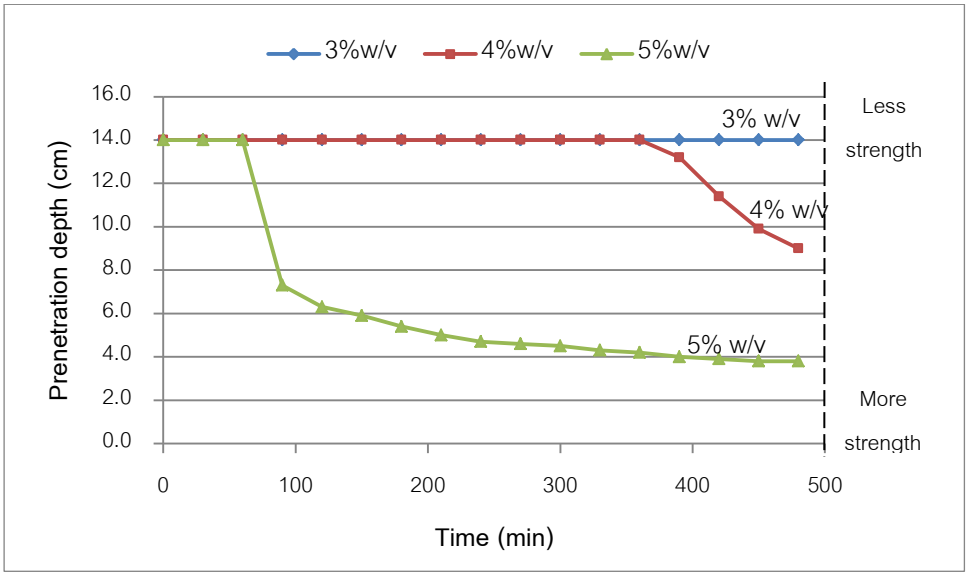
งานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล 3 ปัจจัย คือ ปริมาณฟูมซิลิกา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณพอลิแอสพาร์เทต สำหรับสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตไม่ส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณา

1. ผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อระยะเวลาการเกิดเจลที่อัตราเร็วในการกวนต่างกัน

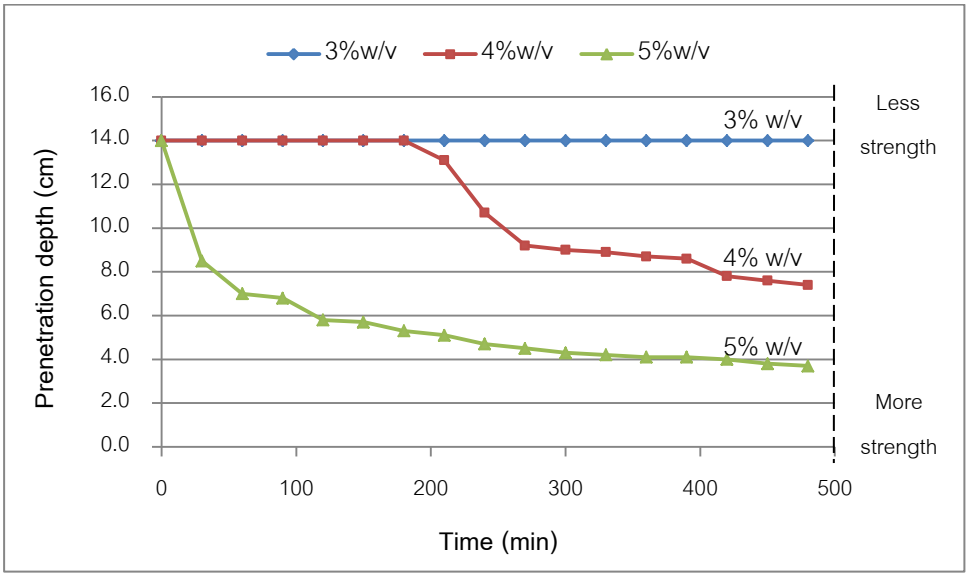
ผลของปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวนจะทำการพิจารณาไปพร้อมๆ กัน โดยผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที แสดงในรูปที่ 4.3 ก) พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3% w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่มากกว่า 8 ชั่วโมง และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% และ 5% w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่ 6 ชั่วโมง 30 นาที และ 1 ชั่วโมง 30 นาที ตามลำดับ โดยเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีฟูมซิลิกาปริมาณมากจะทำให้กระบวนการสร้างเจลในขั้นตอนการสร้างพันธะไซโลเซนเกิดได้มากเมื่อเทียบกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีฟูมซิลิกาปริมาณน้อย ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข) เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3% w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่มากกว่า 8 ชั่วโมง และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% และ 5% w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่ 3 ชั่วโมง 30 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อัตราเร็วในการกวน 4,000 รอบต่อนาทีจะมีระยะเวลาการเกิดเจลที่สั้นกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที โดยเฉพาะที่ปริมาณฟูมซิลิกา 4% และ 5% w/v เนื่องจากที่อัตราการกวนมากขึ้นจะทำให้อนุภาคฟูมซิลิกามีการกระจายตัวที่มากกว่า [41] ส่งผลให้โอกาสการเกิดพันธะไซโลเซนเกิดได้แข็งแรงและเร็วกว่า ทำให้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีระยะเวลาการเกิดเจลที่สั้นกว่า

ตารางที่ 4.1 แสดงระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจลเปรียบเทียบระหว่างปริมาณฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อปริมานฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลงและความแข็งของเจลเพิ่มมากขึ้น และจะให้ผลเช่นเดียวกันทั้งที่ 2 อัตราเร็ว และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณฟูมซิลิกาเท่ากัน จะพบว่าเมื่อใช้อัตราเร็วที่สูงขึ้น จะทำให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่สั้นลง และความแข็งของเจลมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาปริมาณมากหรือใช้อัตราเร็วในการกวนสูง จะทำให้โครงสร้างของเจลจับตัวอย่างหนาแน่น ทำให้เจลมีความเป็นรูพรุนต่ำ (gel porosity) ในขณะที่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟูมซิลิกาน้อยหรือใช้อัตราเร็วในการกวนต่ำ จะทำให้โครงสร้างของเจลมีการจับตัวกันอย่างหลวมๆ และมีความเป็นรูพรุนสูง ดังนั้นเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟูมซิลิกามาก และมีอัตราเร็วในการกวนสูงจะทำให้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้มีความแข็งมากขึ้น

ก)



ข)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกาต่างๆ ก) อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที ข) อัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวนต่อระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจล

Fume silica (%w/v)	gelling time (min)		gel strength (cm)	
	2,000 rpm	4,000 rpm	2,000 rpm	4,000 rpm
3	> 480	> 480	14.00	14.00
4	390	210	6.20	5.30
5	90	30	3.00	2.30

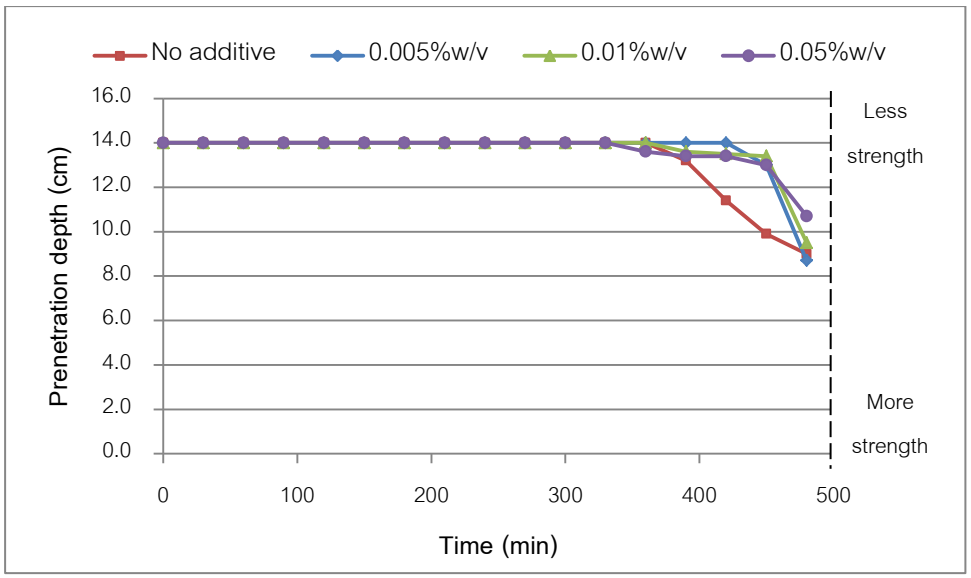
2. ผลของปริมาณสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตที่มีต่อระยะเวลาการเกิดเจลที่อัตราเร็วในการกวนต่างกัน

การศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตจะศึกษาในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟูมซิลิกา 4% w/v เนื่องจากมีระยะเวลาในการเกิดเจลไม่มากและไม่น้อยเกินไป อยู่ในช่วงประมาณ 3 – 6 ชั่วโมง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยจะทดสอบที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 ต่อนาที พบว่าที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาทีอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาการเกิดเจลนานขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 ก) โดยอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% 0.01% และ 0.05% w/v เจลมีช่วงระยะเวลาการเกิดเจลเริ่มต้นที่ 7 ชั่วโมง 30 นาที 6 ชั่วโมง 30 นาที และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปริมาณของพอลิแอสพาร์เทตเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาการเกิดเจลนานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง พบว่ามีเพียงเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ที่ให้ระยะเวลาการเกิดเจลนานกว่า และการเติมพอลิแอสพาร์เทต 0.01% w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลเท่ากับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง และการเติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่สั้นกว่า แต่จะเห็นว่าเจลมีความหนืดน้อยกว่า พิจารณาจากระยะทางการเคลื่อนที่ของตะกั่วของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตจะมีระยะทางที่ยาวกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง และเมื่อพิจารณาที่อัตราการกวนที่ 4,000 รอบต่อนาทีดังแสดงในรูปที่ 4.4 ข) โดยอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% 0.01% และ 0.05% w/v เจลมีช่วงระยะเวลาการเกิดเจลเริ่มต้นที่ 5 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตจะทำให้ระยะเวลาการเกิดเจลนานขึ้นเช่นเดียวกันกับที่อัตราเร็ว 2,000

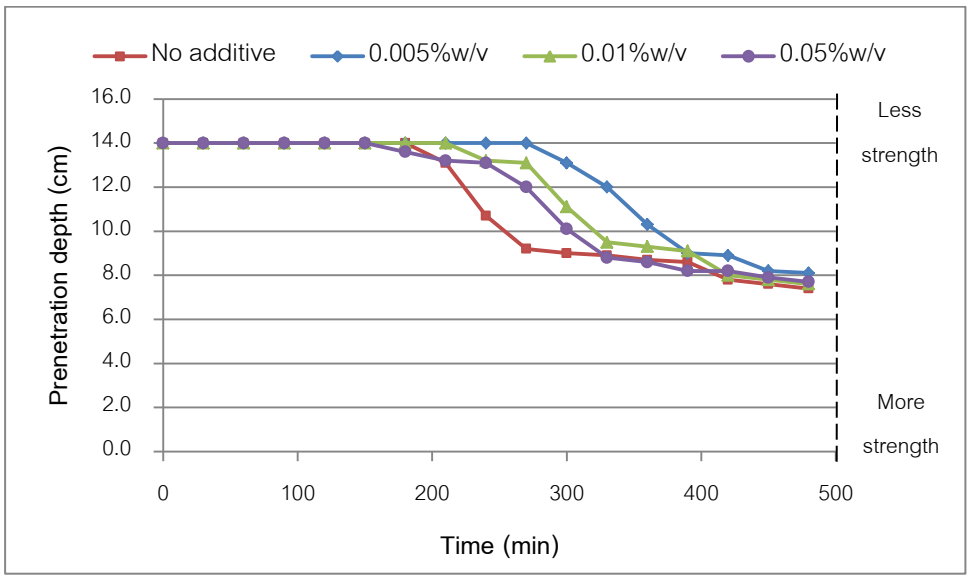
รอบต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง พบว่ามีเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% และ 0.01%w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่นานกว่า และการเติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v ให้ระยะเวลาการเกิดเจลที่สั้นกว่า แต่เจลที่เติมพอลิแอสพาร์เทตจะมีความหนืดน้อยกว่า ดังจะเห็นได้จากระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วที่ยาวกว่า นอกจากนี้ยังจะเห็นว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีช่วงของระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วที่คงที่อยู่ที่ค่าใกล้เคียงกันประมาณ 8 เซนติเมตร ซึ่งที่อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาทีช่วงระยะเวลาที่ทดสอบ 8 ชั่วโมง ยังไม่ทำให้เห็นช่วงคงที่ของการเกิดเจล ดังนั้นจะเห็นว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในเจลอิเล็กโทรไลต์สามารถทำให้ระยะเวลาการเกิดเจลนานขึ้นเล็กน้อย และทำให้เจลมีความหนืดต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากผลของค่า pH ของเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยพอลิแอสพาร์เทตที่เติมลงในอิเล็กโทรไลต์มีค่า pH ประมาณ 9 -11 ซึ่งเมื่อเติมลงในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ทำการทดลองที่มีค่า pH ต่ำกว่า 0 (ความเข้มข้น 5.8 โมลต่อลิตร) อาจทำให้ค่า pH ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีค่าสูงขึ้น โดยค่า pH จะมีผลต่อระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจล คือค่า pH ที่สูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการเกิดเจลสั้นลงและความแข็งของเจลน้อยลง [4] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแอสพาร์เทตให้สูงขึ้น แม้ค่า pH จะมากขึ้น แต่เจลที่ได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากพอลิแอสพาร์เทตเป็นสารพอลิเมอร์ ซึ่งเมื่อเติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์จะทำให้เจลที่ได้มีลักษณะคล้ายพอลิเมอร์มากขึ้น ทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของเจลลดลง ส่งผลให้การสร้างเจลเกิดได้เร็วขึ้นและระยะเวลาการเกิดเจลสั้นลง [4] ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแอสพาร์เทตในเจลอิเล็กโทรไลต์ระยะเวลาการเกิดเจลจะสั้นลง

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจลเปรียบเทียบระหว่างพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที พบว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตจะทำให้ความแข็งของเจลลดลงทั้งที่อัตราการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณพอลิแอสพาร์เทตเท่ากัน พบว่าที่อัตราการกวนสูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการเกิดเจลสั้นลงและความแข็งของเจลมากขึ้น ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดต่อระยะเวลาการเกิดเจลคือปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวน ส่วนการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตมีส่วนช่วยให้เจลที่เตรียมได้มีความหนืดลดลงเล็กน้อย

ก)



ข)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณพอลิแอสพาร์เทตต่างๆ ก) อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที ข) อัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาพอลิแอสพาร์เทตและอัตราเร็วในการกวนต่อระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจล

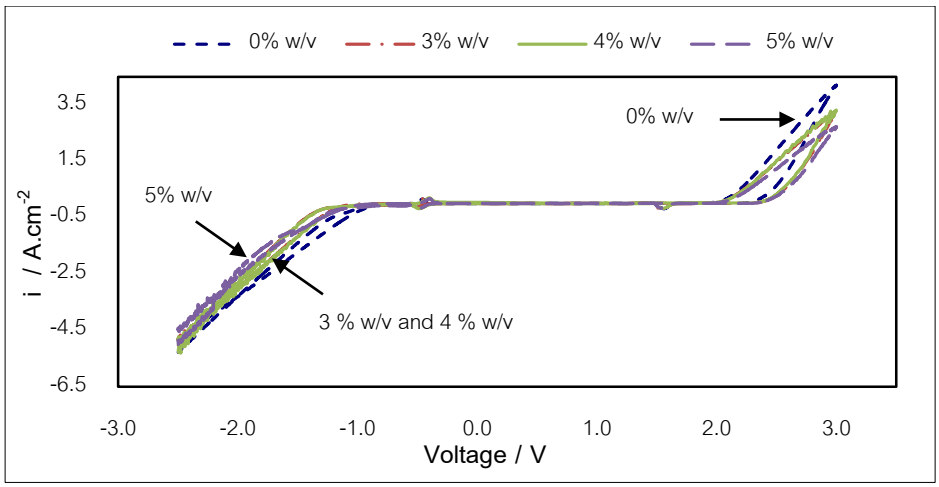
PASP (%w/v)	gelling time (min)		gel strength (cm)	
	2,000 rpm	4,000 rpm	2,000 rpm	4,000 rpm
0	390	210	6.20	5.30
0.005	450	300	7.50	6.50
0.01	390	240	7.30	6.00
0.05	360	180	6.60	5.70

4.2.1.2 ผลการทดสอบเจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

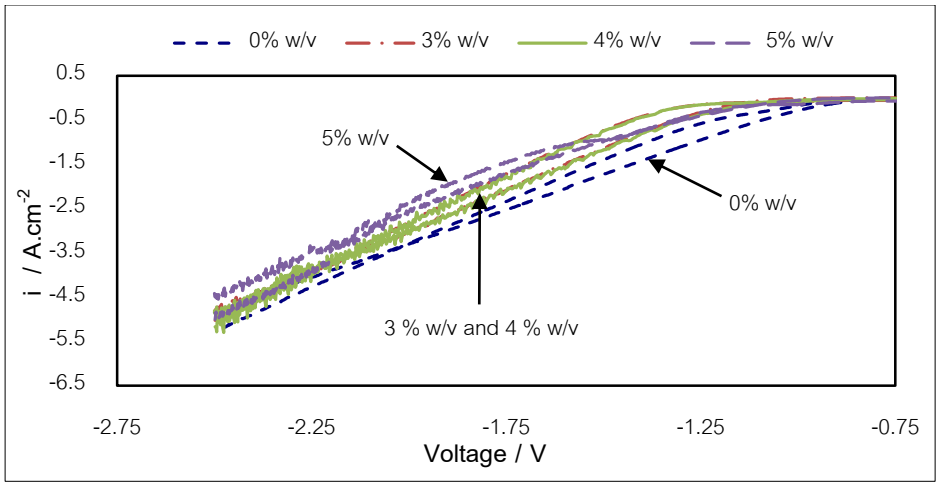
1. ผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่อัตราการกวนต่างกัน

ผลการวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโทรไลต์เหลว (0% w/v) และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณที่ต่างกันที่อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 4.5 ก) และที่อัตราการกวน 4,000 รอบต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 4.6 ก) พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ พิจารณาได้จากช่วงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของเจลอิเล็กโทรไลต์ให้พีกของการเกิดปฏิกิริยาตรงกับพีกการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลต์เหลว เมื่อพิจารณาส่วนของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในรูปที่ 4.5 ข) และ 4.6 ข) และปฏิกิริยาการเกิดแก๊สออกซิเจนในรูปที่ 4.5 ค) และ 4.6 ค) พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ทุกปริมาณของฟูมซิลิกามีปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ยากกว่าอิเล็กโทรไลต์เหลวเล็กน้อย พิจารณาได้จากช่วงค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะเลื่อนไปทางด้านที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่า และช่วงค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สออกซิเจนจะเลื่อนไปทางด้านที่มีค่าความต่างศักย์สูงกว่า นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนพิจารณาจากความสูงของค่าความหนาแน่นกระแส พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์มีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ต่ำกว่าอิเล็กโทรไลต์เหลว เนื่องจากเจลอิเล็กโทรไลต์มีโครงสร้างเป็นแบบสามมิติ เมื่อมีการประจุไฟฟ้าเกิน แก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านเจลอิเล็กโทรไลต์โดยผ่านรอยแยกขนาดเล็ก (micro crack) ของเจลไปยังขั้วลบซึ่งเกิดขึ้นได้ดีกว่าในอิเล็กโทรไลต์เหลว โดยออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะไปเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วลบ ได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.3.2.2 และเมื่อมีปริมาณฟูมซิลิกาที่มากขึ้น จะทำให้เจลมีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีรอยแยกขนาดเล็กมากขึ้น ดังนั้นปริมาณฟูมซิลิกาที่มากขึ้นจะช่วยลดอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยที่ปริมาณฟูมซิลิกา 5% w/v จะมีอัตราการเกิดแก๊สต่ำที่สุด ส่วน 3% และ 4% w/v จะมีอัตราที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจสรุปได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดการสูญเสียน้ำของแบตเตอรี่ได้

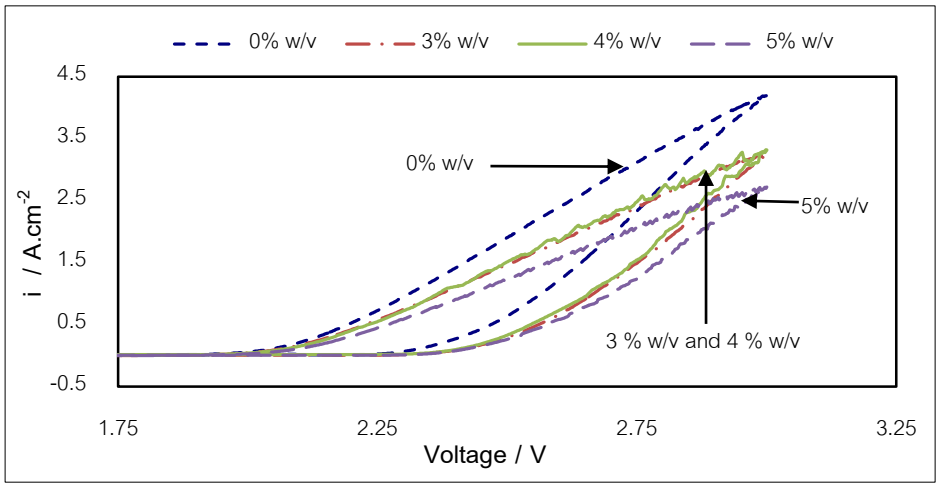
ก)



ข)

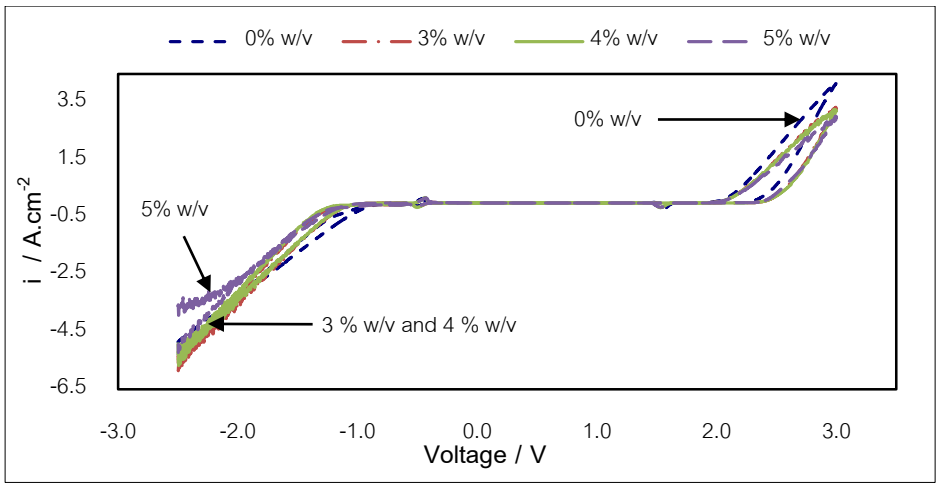


ค)

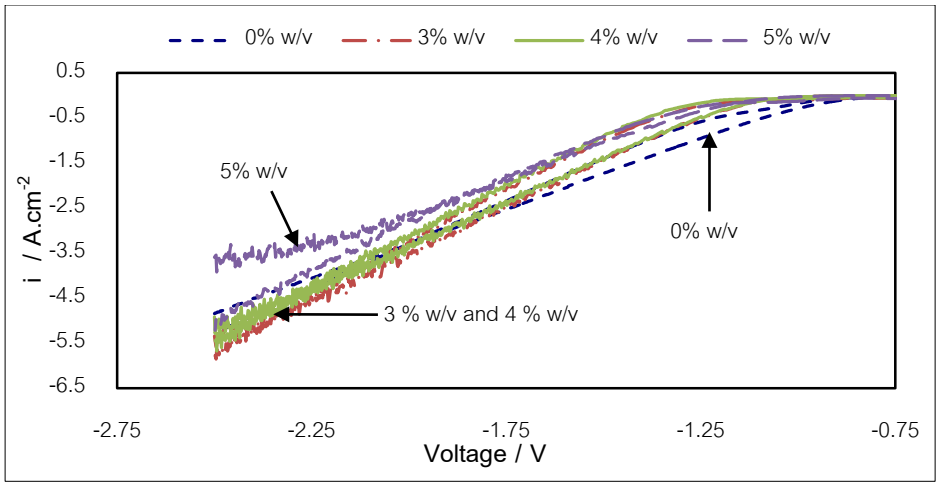


รูปที่ 4.5 กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

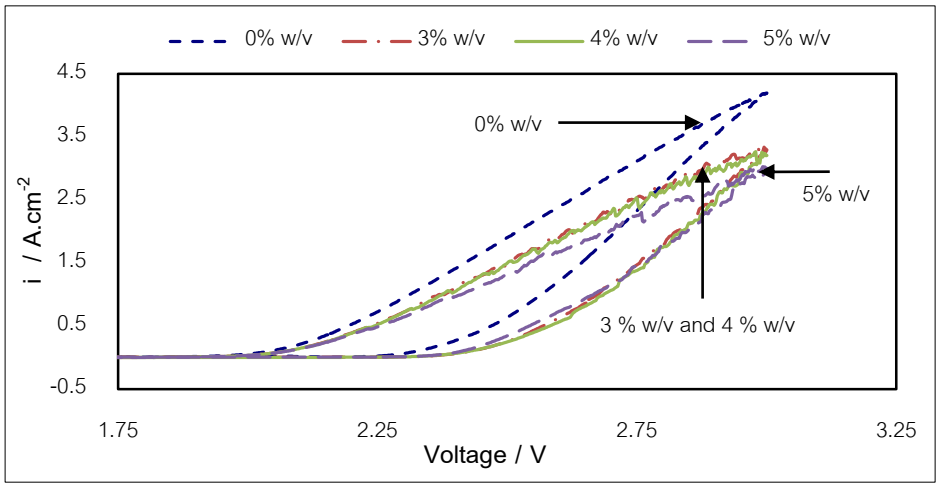
ก)



ข)

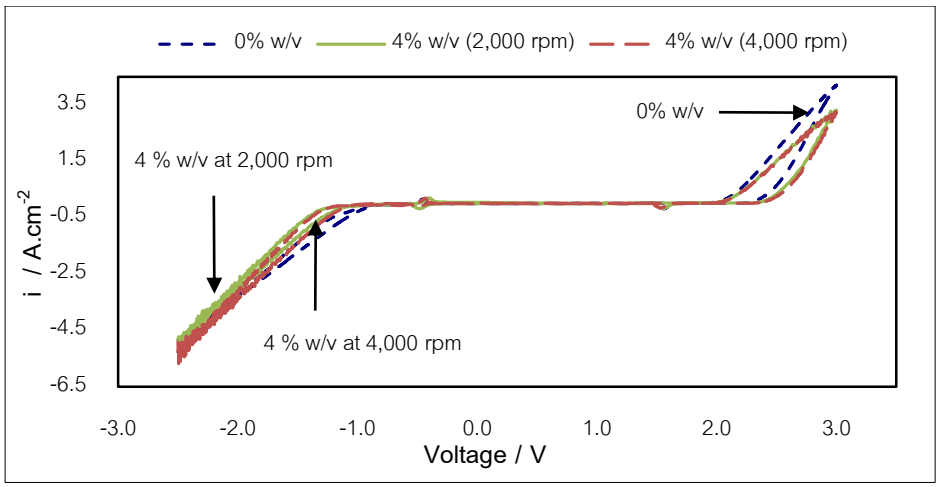


ค)

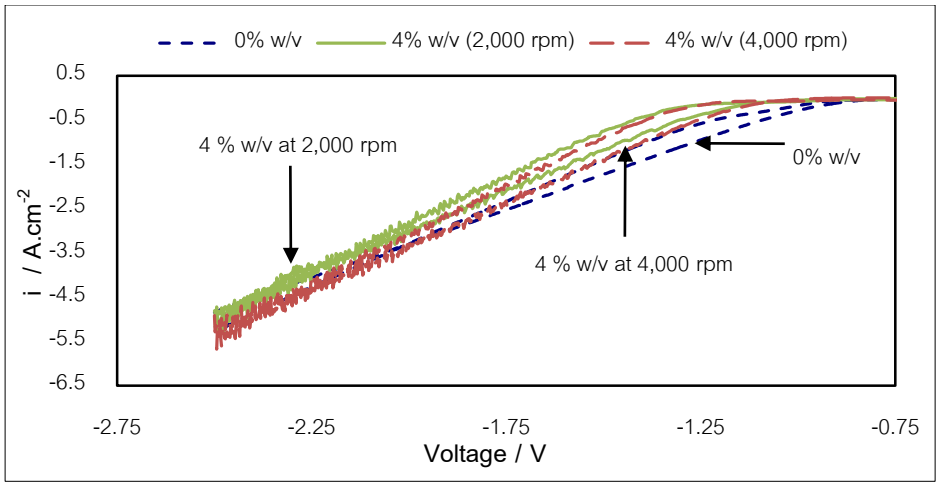


รูปที่ 4.6 กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

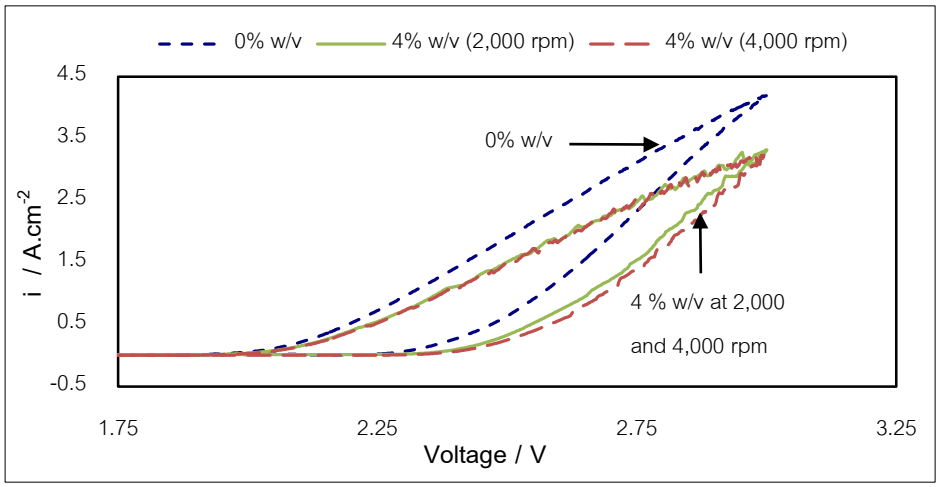
ก)



ข)



ค)



รูปที่ 4.7 กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

ผลการวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมรี เปรียบเทียบระหว่างเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ปริมาณฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.7 ก) พบว่าเส้นกราฟของเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองให้พีกของการเกิดปฏิกิริยาตรงกับพีกการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลต์เหลว และเส้นกราฟของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในรูปที่ 4.7 ข) และปฏิกิริยาการเกิดแก๊สออกซิเจนในรูปที่ 4.7 ค) มีค่าใกล้เคียงกัน และค่าอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนก็มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีความสูงของค่าความหนาแน่นกระแสใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราเร็วในการกวนไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ รวมถึงไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาส่วนขยายของช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างกัน ที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ ข.2 และ ข.3 ตามลำดับ พบว่าไม่มีพีกของปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างกัน เปรียบเทียบกับอิเล็กโทรไลต์เหลว โดยความสูงและตำแหน่งของพีกจะแตกต่างกันเล็กน้อยแบบไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งอาจจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเล็กน้อย แต่จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนจากการทดลองอาจมีผลมากกว่า ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้จะพิจารณาเพื่อยืนยันว่าการทำเจลอิเล็กโทรไลต์โดยการเติมฟูมซิลิกาไม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอื่นนอกเหนือจากปฏิกิริยาหลักในการดำเนินงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และเมื่อพิจารณาส่วนขยายของช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v เปรียบเทียบอัตราเร็วในการกวนที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.4 พบว่าไม่มีพีกของปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวนไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาหลักในการดำเนินงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

2. ผลของปริมาณสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต

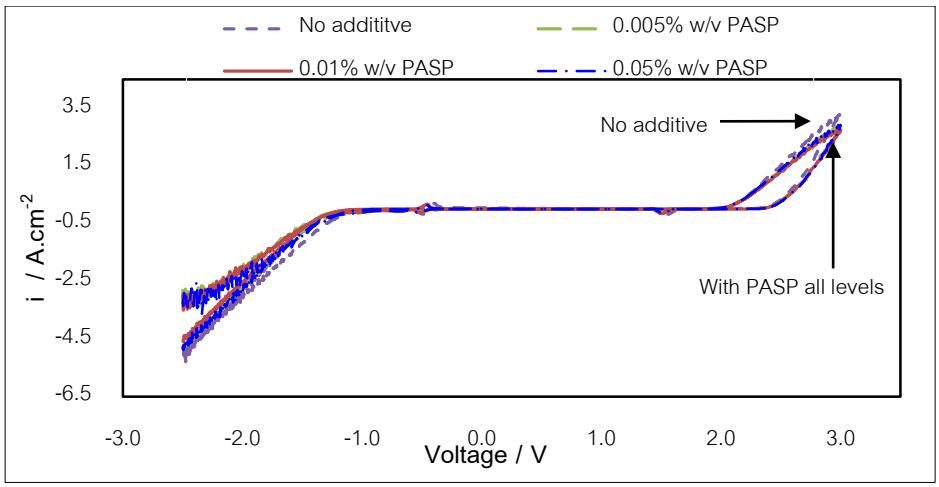
การศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตจะทดสอบในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที โดยผลการวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมรีเปรียบเทียบเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต (0% w/v) และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตปริมาณที่ต่างกันที่อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 4.8 ก) และที่อัตราการกวน 4,000 รอบต่อนาทีแสดงดังรูปที่

4.9 ก) พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ พิจารณาได้จากช่วงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตให้พีกของการเกิดปฏิกิริยาตรงกับพีกการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต

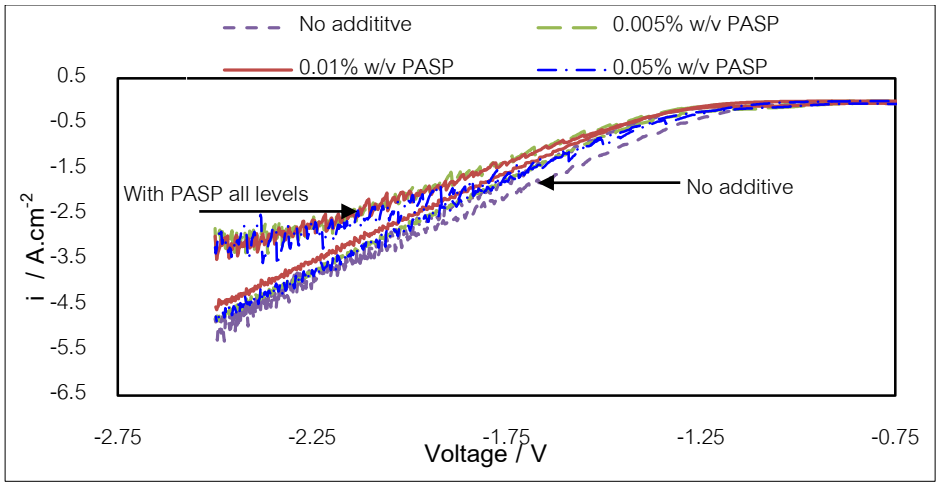
เมื่อพิจารณาส่วนของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในรูปที่ 4.8 ข) และ 4.9 ข) และปฏิกิริยาการเกิดแก๊สออกซิเจนในรูปที่ 4.8 ค) และ 4.9 ค) พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์เติมพอลิแอสพาร์เทตทุกปริมาณไม่ส่งผลต่อความยากง่ายของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน เพราะทุกความเข้มข้นของพอลิแอสพาร์เทตให้กราฟที่ซ้อนทับกัน ดังนั้นความเข้มข้นของพอลิแอสพาร์เทตไม่มีผลต่อความยากง่ายของการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน แต่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยมีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต โดยความสูงของค่าความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย ซึ่งให้ผลเหมือนกันที่อัตราเร็วในการกวนทั้ง 2 ค่า ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนได้ และอาจช่วยลดการสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่ได้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาส่วนขยายของช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ ข.5 และ ข.6 ตามลำดับ พบว่าไม่มีพีกของปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตเปรียบเทียบกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต โดยความสูงและตำแหน่งของพีกจะแตกต่างกันเล็กน้อยแบบไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งอาจจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเล็กน้อย แต่จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนจากการทดลองอาจมีผลมากกว่า ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้จะพิจารณาเพื่อยืนยันว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตในเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอื่นนอกเหนือจากปฏิกิริยาหลักในการดำเนินงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

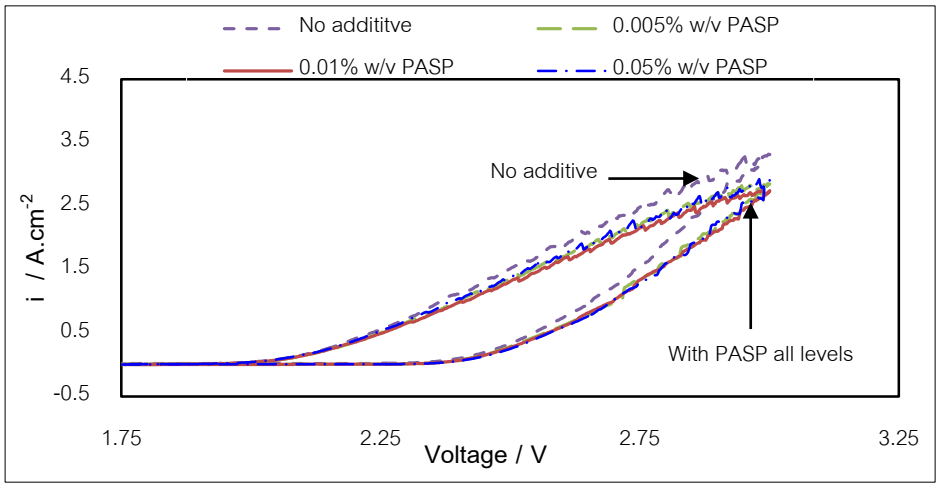
ก)



ข)

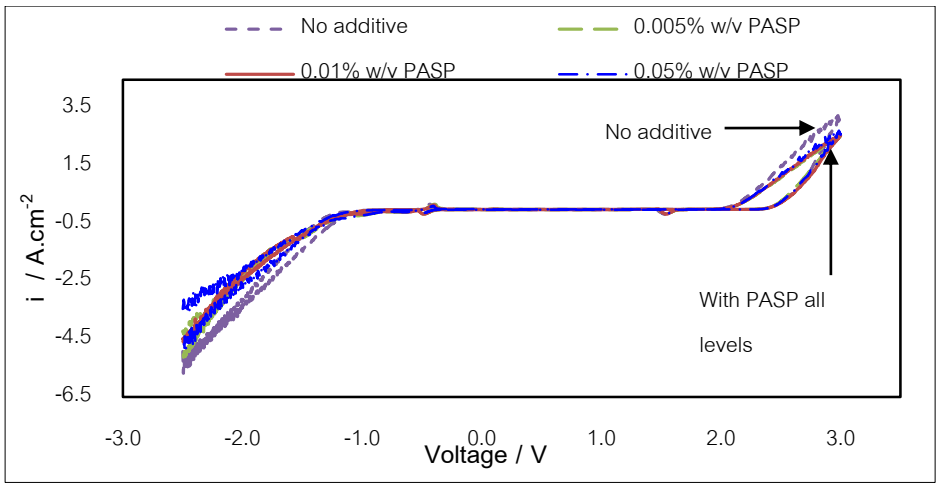


ค)

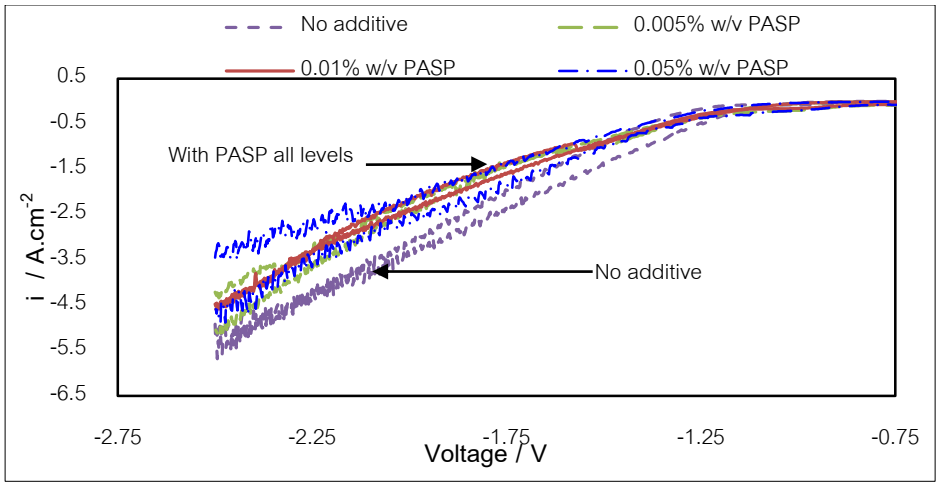


รูปที่ 4.8 กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

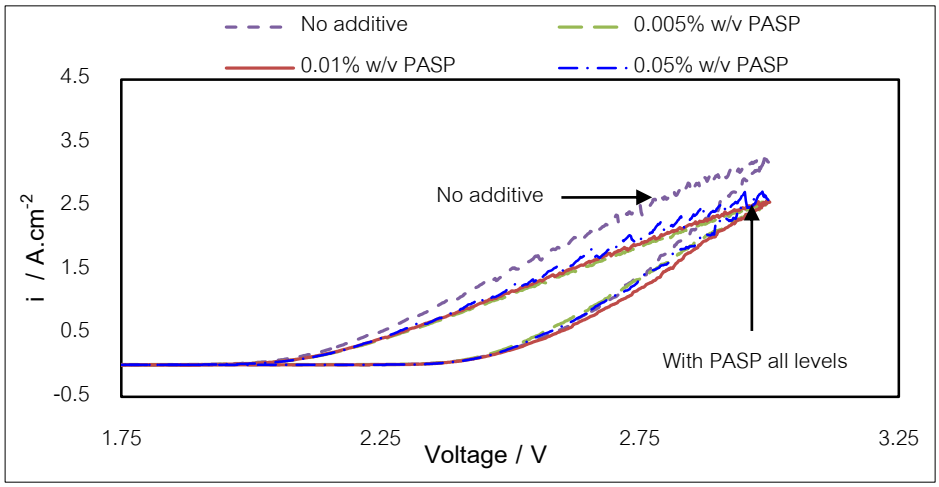
ก)



ข)



ค)



รูปที่ 4.9 กราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ก) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

4.2.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์จะแบ่งเป็นสองส่วน โดยในส่วนแรก คือ การทดสอบผลของปริมาณฟูมซิลิกา และอัตราเร็วในการกวน ซึ่งในส่วนนี้จะทำการทดสอบโดยใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุมขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ และในส่วนที่สอง คือ การทดสอบผลของการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต โดยจะทดสอบในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุมขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ เนื่องจากเป็นขนาดของเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าในปัจจุบัน

การบรรจุอิเล็กโทรไลต์เหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่จะบรรจุลงในแบตเตอรี่ด้วยเครื่องเติมน้ำกรดสุญญากาศ ซึ่งจะพบว่าการเติมอิเล็กโทรไลต์เหลวลงในแบตเตอรี่สามารถเติมได้ง่ายกว่าและใช้เวลาในการเติมสั้นกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนั้นยังพบว่ายิ่งเจลอิเล็กโทรไลต์มีปริมาณฟูมซิลิกามากขึ้น จะยิ่งทำให้กระบวนการเติมเจลทำได้ยาก และระยะเวลาในการเติมยิ่งนานขึ้น เนื่องจากเจลมีความหนืดสูงขึ้น จึงทำให้กระบวนการเติมเจลทำได้ยากขึ้น

4.2.2.1 ผลของปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วการกวนที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่

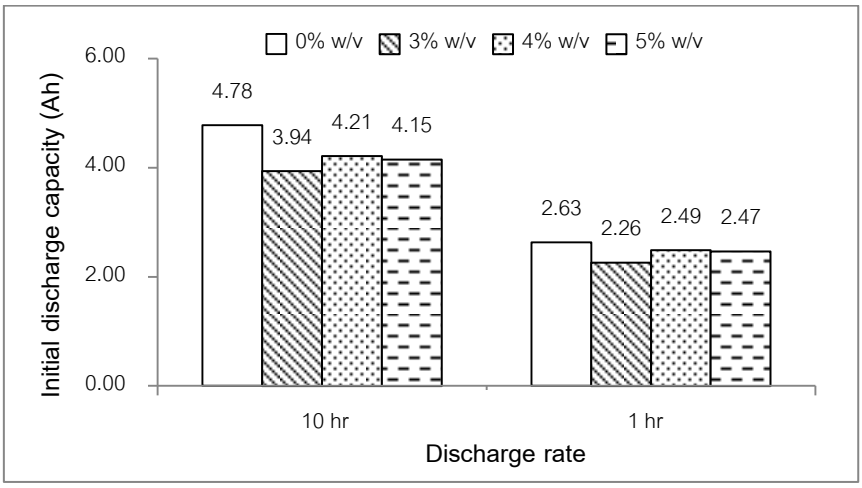
การทดสอบผลของปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วการกวนที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ จะทำการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และที่อัตราการเร็วในการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

1. การทดสอบภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง)

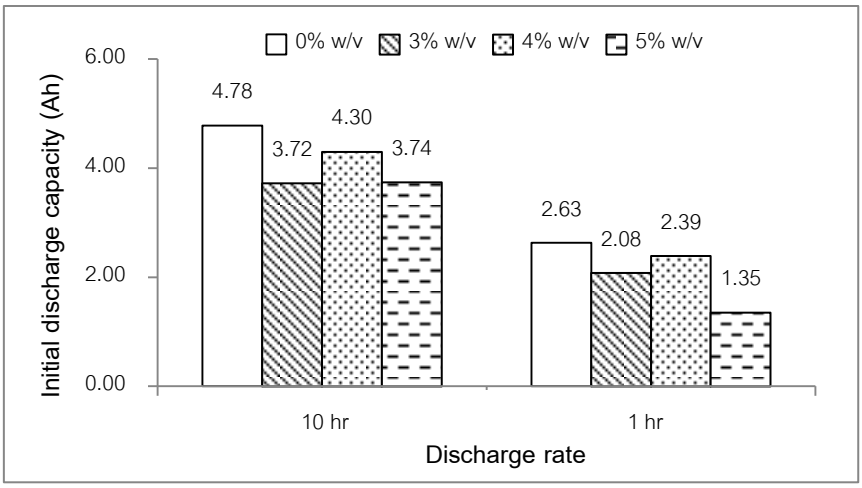
ผลของปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวนที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าเจลแบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุเริ่มต้น (รอบที่ 1) ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลว เนื่องจากในกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่นั้น เจลจะมีความหนืดมากกว่าอิเล็กโทรไลต์เหลว ดังนั้นเมื่อเติมเจลลงในแบตเตอรี่จะทำให้การกระจายตัวของเจลภายในแบตเตอรี่เกิดได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลว จึงทำให้ภายในแบตเตอรี่มีช่องว่างภายใน

มาก ส่งผลให้การถ่ายโอนประจุระหว่างเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการคายประจุทำได้ยากกว่า ดังนั้น ค่าการคายประจุเริ่มต้นของเจลแบตเตอรี่จึงต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลว

ก)



ข)



รูปที่ 4.10 ค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นที่อัตราเร็วการคายประจุ 10 และ 1 ชั่วโมงเปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ก) อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที ข) 4,000 รอบต่อนาที

อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) ความแตกต่างของค่าความจุในการคายประจุเริ่มต้นระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะเจลและภาวะของเหลวจะลดลง เนื่องจากเจลอิเล็กโทรไลต์มีสมบัติไทโซโทรปี คือจะอ่อนตัวลงเมื่อมีแรงมากระทำกับเจล ในทางกลับกันเจลก็จะแข็งตัวขึ้นเมื่อไม่มีแรงมากระทำกับเจล ซึ่งแรงที่มากระทำกับเจลโดยทั่วไป

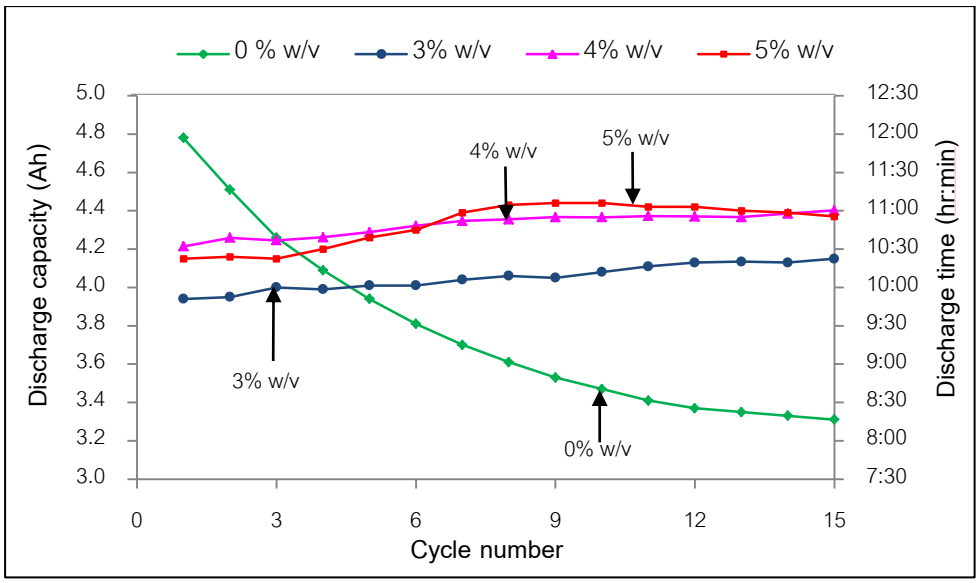
หมายถึงแรงที่มาจากการกวนเจล แต่ในกรณีของเจลที่ถูกบรรจุอยู่ในแบตเตอรี่ แรงที่มากระทำกับเจลจึงหมายถึงแรงจากแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการคายประจุและอัดประจุไฟฟ้า ดังนั้นในระหว่างกระบวนการคายประจุและอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ จึงเปรียบเสมือนการให้แรงกระทำกับเจล โดยเจลจะอ่อนตัวลง และสามารถถ่ายโอนประจุในอิเล็กโทรไลต์ได้ดีขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอัตราการคายประจุเปรียบได้กับการเพิ่มแรงที่มากระทำกับเจล การคายประจุที่อัตราการคายประจุสูงจึงส่งผลให้เจลมีความอ่อนตัวลงมากกว่าที่อัตราการคายประจุต่ำ ดังนั้นที่อัตราการคายประจุสูง เจลจะมีความอ่อนตัวลงและลดช่องว่างภายในแบตเตอรี่ ทำให้การถ่ายโอนประจุทำได้ดีขึ้น สำหรับปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวนส่งผลแบบไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่มากนัก

การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่มีฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ภายใต้การคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พบว่าแม้ว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวจะให้ค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ แต่เมื่อจำนวนรวบของการทดสอบเพิ่มมากขึ้น จะเห็นว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เหลวจะให้ค่าความจุประจุลดลง อาจเนื่องมาจากแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เหลวมีการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่สูงกว่า จึงทำให้แบตเตอรี่มีการเสื่อมสมรรถนะที่เร็วกว่า ในทางกลับกันเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบเพิ่มมากขึ้น เจลแบตเตอรี่จะให้ค่าความจุการคายประจุที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบการทดสอบหมายถึงการให้แรงมากระทำกับเจลอย่างต่อเนื่องผ่านกระบวนการอัดและคายประจุ จึงทำให้เจลอิเล็กโทรไลต์เกิดการอ่อนตัวและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้น ช่วยลดช่องว่างภายในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เจลสามารถถ่ายโอนประจุได้ดีขึ้น จึงทำให้มีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้นและคงที่ นอกจากนี้เจลแบตเตอรี่มีการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่น้อยกว่าแบตเตอรี่เหลว จึงทำให้แบตเตอรี่มีการเสื่อมสมรรถนะที่น้อยกว่า ซึ่งจำนวนรอบที่ใช้ทดสอบนี้ยังไม่ทำให้เห็นการเสื่อมสมรรถภาพของเจลแบตเตอรี่

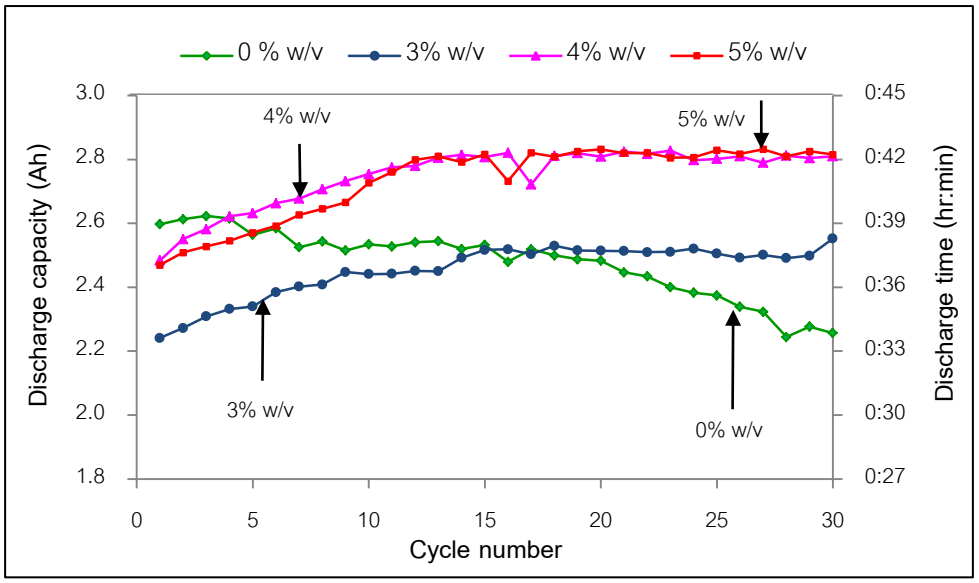
การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่มีฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที ภายใต้การคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 4.11 ก) และ ข) ตามลำดับ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% และ 5% w/v ให้ค่าความจุการคายประจุที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3% w/v ให้ค่าความจุการคายประจุที่ต่ำที่สุด ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันทั้งที่อัตราการคายประจุต่ำและสูง และการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่มีฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราการกวน 4,000

รอบต่อนาที ภายใต้การคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 4.12 ก) และ ข) ตามลำดับ พบว่าที่อัตราการคายประจุต่ำ เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v ให้แนวโน้มค่าความจุการคายประจุที่สูงกว่า 5% w/v และ 3% w/v ตามลำดับ ในขณะที่การทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v มีค่าความจุการคายประจุที่สูงกว่า 3% w/v และ 5% w/v ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5% w/v ให้ค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำมากๆ อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการเติมเจลอิเล็กโทรไลต์ เจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5% w/v ที่อัตราการกวน 4,000 รอบต่อนาที เจลเกิดการแข็งตัวก่อนขั้นตอนการเติมจะเสร็จสิ้น เนื่องจากเจลมีความหนืดสูงและระยะเวลาการเกิดเจลที่สั้น (ดังที่กล่าวในส่วนของผลปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วการกวน) ทำให้ปริมาตรของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมลงในแบตเตอรี่ได้น้อยกว่าปริมาตรจริง ทำให้แบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ไม่เต็มเซลล์ เกิดช่องว่างภายในเซลล์แบตเตอรี่มากและส่งผลให้แบตเตอรี่มีค่าความจุการคายประจุที่ต่ำ

ก)

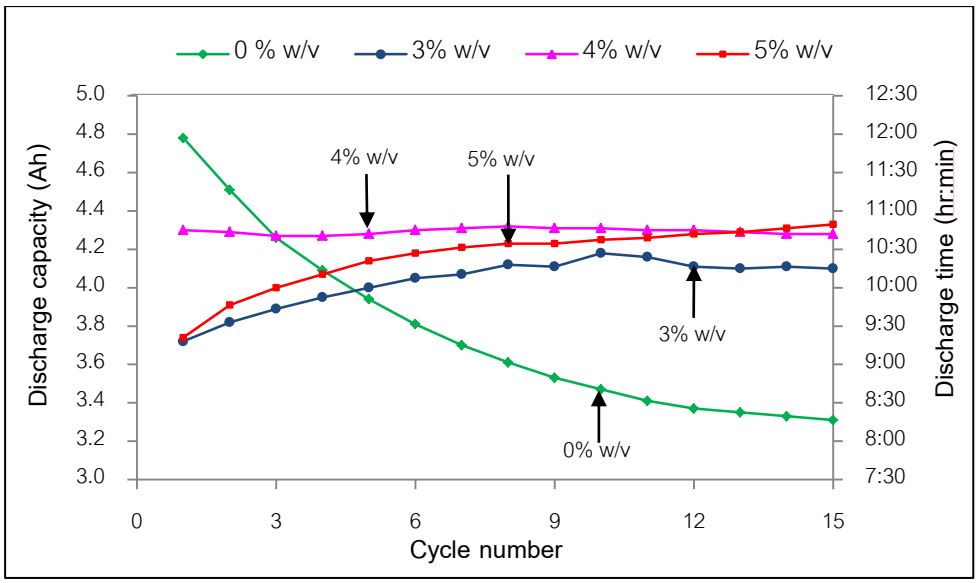


ข)

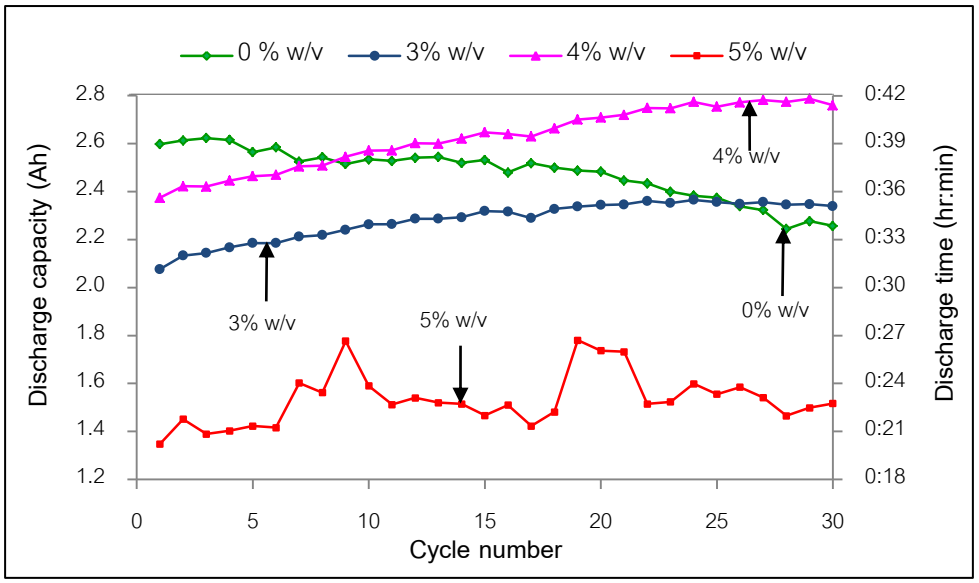


รูปที่ 4.11 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยใช้อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง

ก)

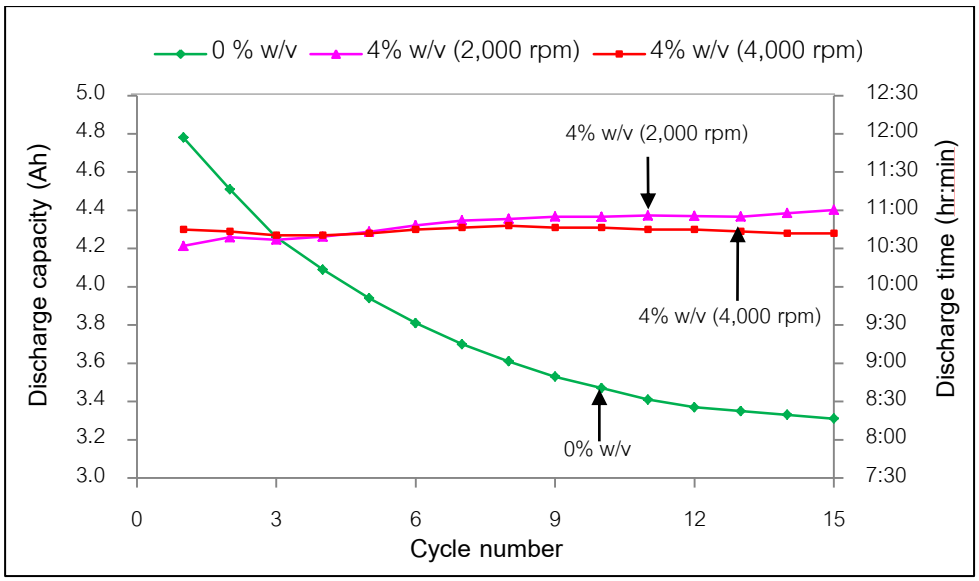


ข)

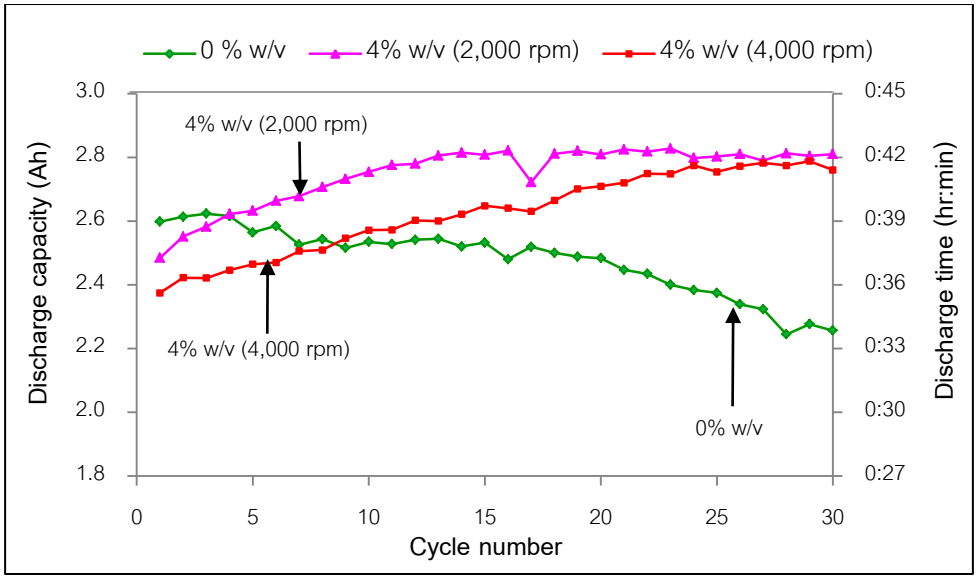


รูปที่ 4.12 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยใช้อัตราการกวน 4,000 รอบต่อนาที ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง

ก)



ข)



รูปที่ 4.13 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v เปรียบเทียบอัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆที่อัตราการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที จะพบว่าปริมาณฟูมซิลิกา 4% และ 5% w/v จะให้แนวโน้มค่าความจุประจุที่สูง แต่เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจลร่วมด้วย จะพบว่าเจลที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกา 5% w/v ส่งผลเสียต่อกระบวนการบรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณาเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นปริมาณฟูมซิลิกาที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์คือ 4% w/v สมรรถนะของแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v เปรียบเทียบอัตราเร็วในการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) แสดงในรูปที่ 4.13 ก) และ ข) พบว่าที่อัตราการคายประจุต่ำแบตเตอรี่ที่มีฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราการกวนทั้ง 2 ค่า จะให้แนวโน้มค่าความจุการคายประจุที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที จะให้ค่าความจุการคายประจุที่สูงกว่าเล็กน้อย เมื่อพิจารณาที่อัตราการคายประจุสูงพบว่าแบตเตอรี่ที่มีฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที จะให้ค่าความจุการคายประจุที่สูงกว่าที่อัตราการกวน 4,000 รอบต่อนาที

ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วนของผลของปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวน เพื่อหาภาวะในการเตรียมเจลที่เหมาะสม จะเห็นว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟูมซิลิกา 4% w/v และใช้อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที มีผลของระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจลที่เหมาะสม ซึ่งเป็นผลดีต่อกระบวนการเติมเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ นอกจากนี้เจลแบตเตอรี่ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ปริมาณฟูมซิลิกา 4% w/v และใช้อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที จะให้ค่าความจุในการคายประจุสูงที่สุด ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลในงานวิจัยนี้ คือ ปริมาณฟูมซิลิกา 4% w/v และอัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที ซึ่งจะนำไปทดสอบผลของสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตต่อการใช้งานของแบตเตอรี่ในภาวะการใช้งานต่างๆต่อไป

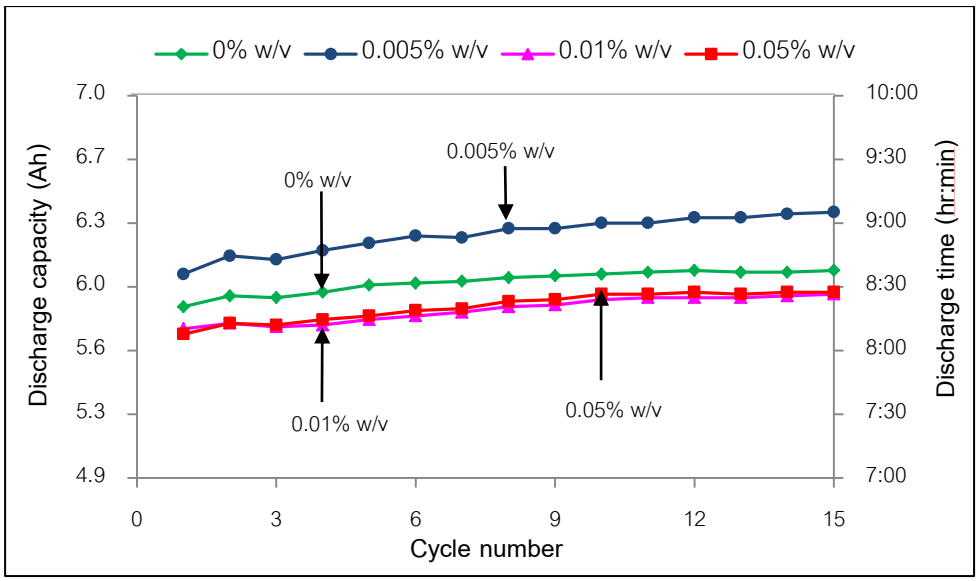
4.2.2.2 ผลของปริมาณพอลิแอสพาร์เทตที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่

จากผลการศึกษาผลของปริมาณฟูมซิลิกาและอัตราเร็วในการกวน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ สามารถสรุปได้ว่าปริมาณฟูมซิลิกา 4% w/v และอัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที เป็นภาวะที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต โดยทำการทดสอบในแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ เนื่องจากเป็นขนาดของเจลแบตเตอรี่ที่นิยมใช้สำหรับทางการค้าในปัจจุบัน ซึ่งการทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเติมพอลิแอสพาร์เทตที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ โดยศึกษาปริมาณสารเติมแต่งที่ 0.005%, 0.01% และ 0.05% w/v และทำการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง)

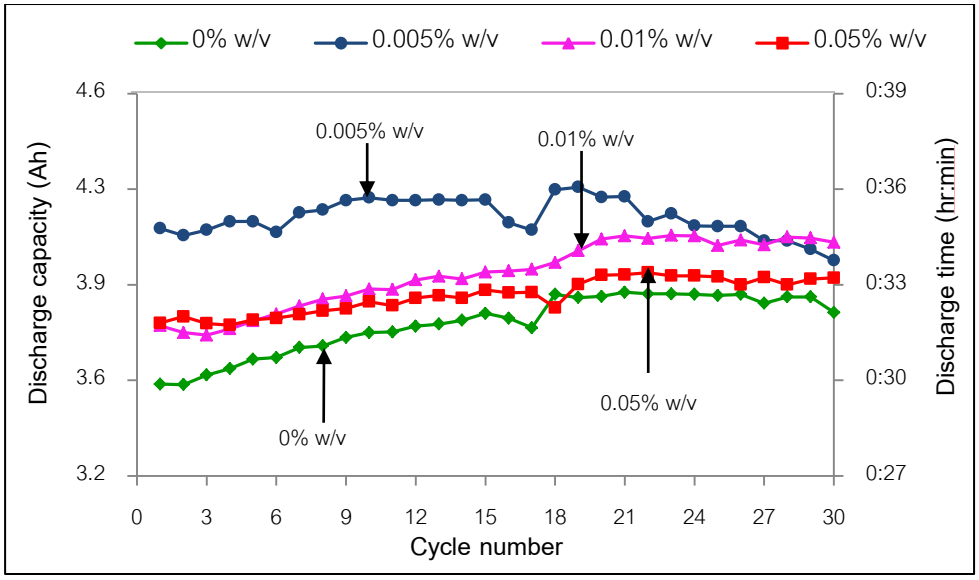
1. การทดสอบภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง)

การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่เพื่อศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (0% w/v) และเจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตในปริมาณต่างๆ พบว่าที่อัตราการคายประจุต่ำ เจลแบตเตอรี่ที่อิเล็กโทรไลต์เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ที่ให้ค่าความจุในการคายประจุสูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.01% และ 0.05% w/v ให้ค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และในส่วนของการทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตทุกปริมาณความเข้มข้น จะให้ค่าความจุในการคายประจุสูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และพอลิแอสพาร์เทตปริมาณ 0.005% w/v จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุสูงที่สุด รองลงมาคือ 0.01% และ 0.05% w/v ตามลำดับ ถึงแม้ว่าในช่วงท้ายของการทดสอบ ค่าความจุประจุของเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v จะมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อพิจารณาค่าความจุประจุเฉลี่ยแล้วเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ยังคงให้ค่าความจุประจุเฉลี่ยที่สูงที่สุด คือ 4.07 แอมแปร์-ชั่วโมง รองลงมาคือที่ 0.01% w/v คือ 3.88 แอมแปร์-ชั่วโมง และที่ 0.05% w/v คือ 3.81 แอมแปร์-ชั่วโมง ส่วนเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตพบว่ามีค่าความจุเฉลี่ยของแบตเตอรี่ คือ 3.70 แอมแปร์-ชั่วโมง ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

ก)



ข)



รูปที่ 4.14 สมรรถนะของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมด ก) อัตราเร็วการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วการคายประจุ 1 ชั่วโมง

4.3 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ในภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน

การทดสอบในส่วนนี้ทำการศึกษาการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ภาวะการใช้งานหลายรูปแบบ โดยทำการทดสอบในแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ซึ่งจะนำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ส่งผลให้แบตเตอรี่มีสมรรถนะสูงที่สุดมาทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว กล่าวคือ จากผลการศึกษาภาวะการเตรียมเจลที่เหมาะสม พบว่าปริมาณฟูมซิลิกาที่เหมาะสมคือ 4% w/v และอัตราเร็วในการกวนคือ 2,000 รอบต่อนาที และจากการทดสอบผลของสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต พบว่าแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่สูงที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ภาวะการเตรียมเจลที่เหมาะสมที่สุด คือ ปริมาณฟูมซิลิกา 4% w/v อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที และเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่มีสมรรถนะสูงที่สุด จากนั้นทำการศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน

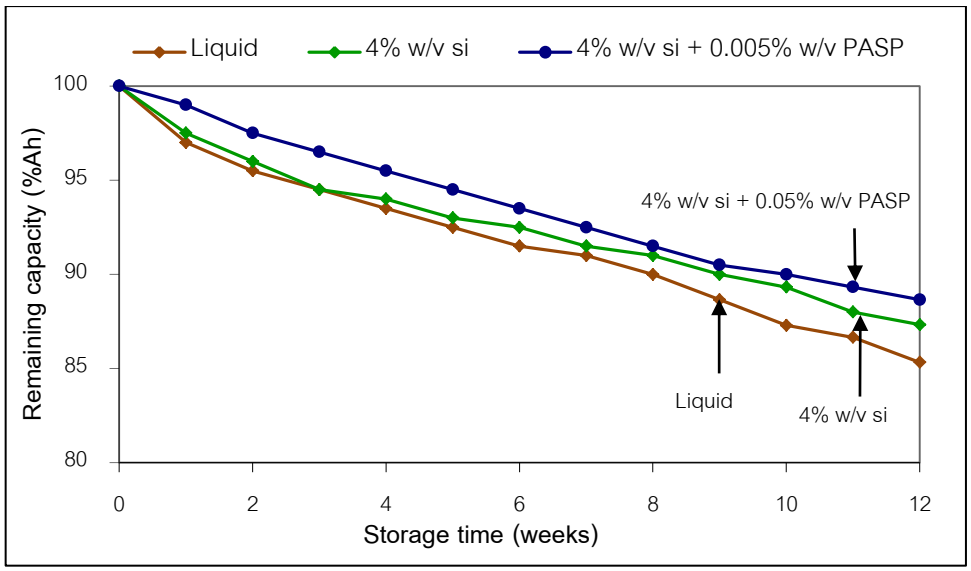
การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ในส่วนนี้แบ่งเป็น 5 ส่วน คือ การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง (self-discharge) การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (cycle life) การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม (partial-state-of-charge) การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูงแบบกระแสคงที่ (constant current high-rate partial-state-of-charge) และการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆ (temperature work)

4.3.1 การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ (self-discharge)

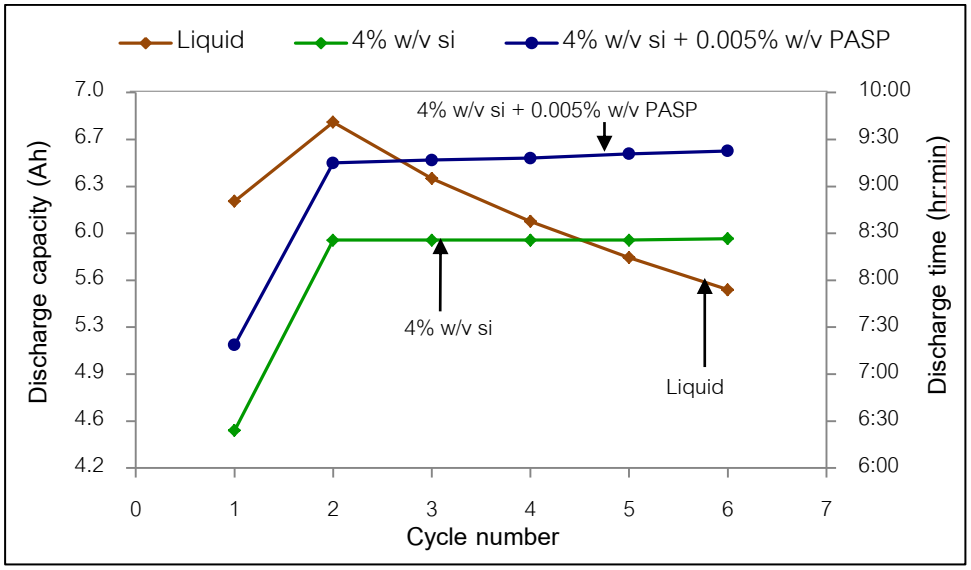
การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่จะทดสอบที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทุกๆ สัปดาห์ พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลา เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการคายประจุขึ้นเองภายในแบตเตอรี่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นี้มีความสัมพันธ์กับค่าความจุที่ยังเหลืออยู่ภายในแบตเตอรี่โดยคำนวณเป็นร้อยละของความจุที่ยังเหลืออยู่ผ่านความสัมพันธ์จากตารางที่ 3.4 ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.15 เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะ

ของเหลวมีอัตราการคายประจุด้วยตัวเองที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ โดยเมื่อสิ้นสุดการเก็บแบตเตอรี่เป็นระยะเวลา 3 เดือน แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวจะมีค่าความจุประจุคงเหลือภายในแบตเตอรี่เพียง 85% และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตจะมีค่าความจุประจุคงเหลือภายในแบตเตอรี่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต คือ 89% และ 87% ตามลำดับ

หลังจากการเก็บแบตเตอรี่เป็นระยะเวลา 3 เดือนแล้ว ได้นำแบตเตอรี่เหล่านั้นมาทดสอบสรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำเป็นจำนวน 6 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลวจะให้ค่าความจุในการคายประจุเริ่มต้นที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่หลังจากนั้นค่าความจุประจุจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวนรอบในการทดสอบมากขึ้น ในทางกลับกันเจลแบตเตอรี่มีค่าความจุประจุเริ่มต้นที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลว แต่เมื่อจำนวนรอบการทดสอบเพิ่มมากขึ้นจะพบว่าเจลแบตเตอรี่มีค่าความจุการคายประจุเพิ่มขึ้นและค่อนข้างคงที่ เนื่องจากเจลอิเล็กโทรไลต์มีสมบัติไทโซทรอปี [4] เมื่อเจลแบตเตอรี่ถูกเก็บมาเป็นเวลานานจะทำให้เจลเกิดการแข็งตัวเพราะไม่มีแรงมากระทำกับเจล การเคลื่อนที่ของไอออนภายในแบตเตอรี่จึงทำได้ยาก ทำให้การทดสอบการคายประจุในรอบแรกมีค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่า แต่สุดท้ายค่าความจุในการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดจะมีค่าสูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว (รอบที่ 6) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุสูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่าความจุประจุของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ กับระยะเวลาในการเก็บเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต

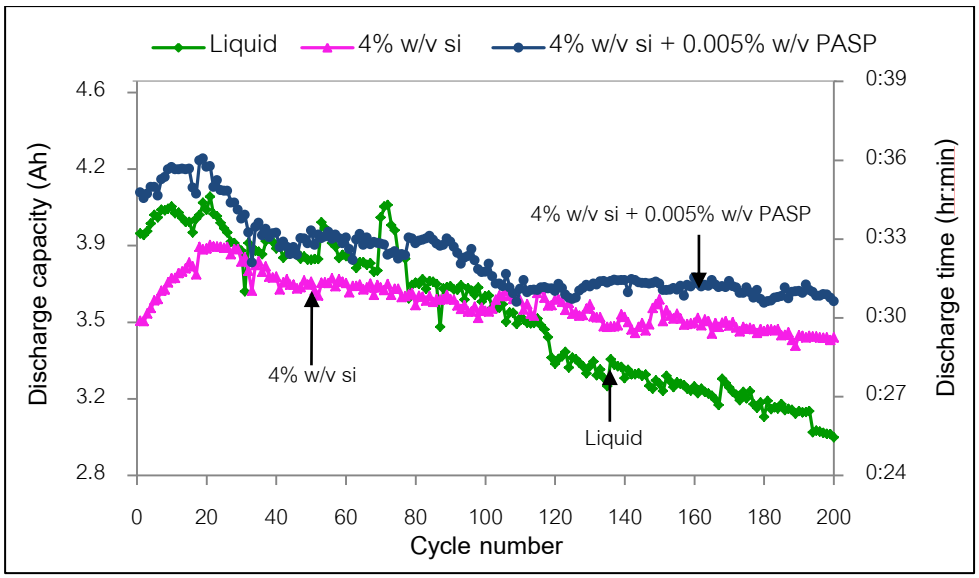


รูปที่ 4.16 สมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) หลังจากเก็บแบตเตอรี่เป็นเวลา 3 เดือน เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวและเจลแบตเตอรี่เติมสารเติมแต่งพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต

4.3.2 **การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่** (cycle life)

ผลการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะทำการทดสอบภายใต้ภาวะการคายประจุหมด (100% depth of discharge, 100%DoD) ที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) เป็นจำนวน 200 รอบแสดงดังรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่และแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว พบว่าที่ช่วงการทดสอบ 100 รอบแรก ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อจำนวนรอบการทดสอบเพิ่มมากขึ้นค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ยังคงมีค่าการคายประจุที่ค่อนข้างคงที่ สาเหตุอาจเนื่องมากจากแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีการแยกชั้นของกรดเกิดขึ้น ซึ่งมักจะเกิดขึ้นภายใต้การดำเนินงานแบบการคายประจุหมด ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่บริเวณด้านล่างของแผ่นขั้ว ส่งผลให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวสูญเสียค่าความจุในการคายประจุและทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสมรรถภาพก่อนกำหนด [4] ดังนั้นแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวจึงมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าเจลแบตเตอรี่ ซึ่งเจลแบตเตอรี่จะให้ค่าความจุในการคายประจุที่สูงกว่าและค่อนข้างคงที่ เนื่องมากจากเจลอิเล็กโทรไลต์เป็นสถานะที่ยากต่อการเคลื่อนไหว จึงไม่มีการแยกชั้นของกรดภายในแบตเตอรี่เกิดขึ้น การกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าจึงน้อยกว่า จึงทำให้เจลแบตเตอรี่มีสมรรถนะที่สูงกว่า

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าเฉลี่ยความจุในการคายประจุและค่าความจุการคายประจุสุดท้ายสูงกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต จึงกล่าวได้ว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์สามารถช่วยให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่นานกว่า อาจเนื่องมาจากการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยให้ผลึกของตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นที่แผ่นขั้วในขั้นตอนการคายประจุมีขนาดผลึกที่เล็กกว่า (ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4) ส่งผลให้การละลายของตะกั่วซัลเฟตเมื่อมีการอัดประจุกลับทำได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ขนาดผลึกของตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่อพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่ผิวของแผ่นขั้ว หากผลึกของตะกั่วซัลเฟตมีขนาดใหญ่จะไปบดบังพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา ทำให้แบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำลง ในทางกลับกันหากตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก จะช่วยให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยายังคงมีอยู่มาก ส่งผลให้แบตเตอรี่มีค่าความจุประจุที่สูง ดังนั้นการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในเจลอิเล็กโทรไลต์สามารถช่วยให้แบตเตอรี่มีค่าความจุประจุที่สูงขึ้นและมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น



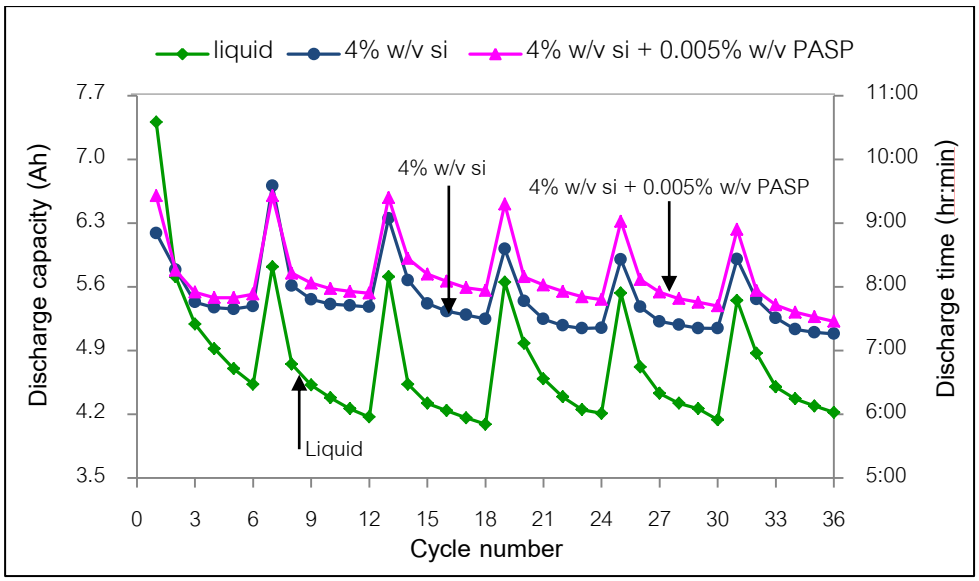
รูปที่ 4.17 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุกับจำนวนรอบอายุการใช้งาน จำนวน 200 รอบ ของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

4.3.3 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม (partial-state-of-charge)

ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม ทำการทดสอบจำนวน 36 รอบ (ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.4.2.4) แสดงดังรูปที่ 4.18 โดยแสดงค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่และเวลาที่ใช้ในการคายประจุกับจำนวนรอบในการทดสอบ ซึ่งจุดพีกแต่ละจุดในกราฟแสดงถึงค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่หลังจากที่แบตเตอรี่ผ่านการอัดประจุจนเต็ม (เช่นรอบที่ 1) โดยจะให้ค่าความจุในการคายประจุที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่ผ่านการอัดประจุไม่เต็ม (เช่นรอบที่ 2) และเมื่อแบตเตอรี่มีการอัดประจุแบบไม่เต็มความจุของแบตเตอรี่ จะส่งผลให้ค่าความจุการคายประจุในรอบถัดไปของแบตเตอรี่ลดลง (รอบที่ 2-6) แม้แบตเตอรี่จะมีการอัดประจุจนเต็มอีกครั้งหนึ่ง ก็จะพบว่าพีกของค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับรอบแรก และจุดพีกจะมีความสูงลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนการทดสอบมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ผ่านการอัดประจุไม่เต็มในรอบถัดไปก็ยังคงมีค่าลดลงตามจำนวนรอบการทดสอบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันทั้งในแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลวและเจลแบตเตอรี่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสะสมของตะกั่ว

ซัลเฟตที่แผ่นขั้ว ซึ่งจะมีการสะสมมากขึ้นเมื่อมีการอัดประจุให้แบตเตอรี่อย่างไม่เพียงพอ [46] โดยตะกั่วซัลเฟตที่สะสมนี้จะไปบดบังพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่แผ่นขั้ว ทำให้ค่าความจุของแบตเตอรี่ลดลง นอกจากนี้จะพบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลวมีค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลวมักมีซัลเฟชันเกิดขึ้นมากกว่าเจล โดยตะกั่วซัลเฟตที่สะสมที่แผ่นขั้วนั้นเกิดการตกตะกอนลงสู่ก้นของแบตเตอรี่ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ และเป็นสาเหตุให้ขั้วเกิดการกัดกร่อน ดังนั้นจึงทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลวสูญเสียค่าความจุในการคายประจุ ซึ่งเจลแบตเตอรี่จะให้ค่าความจุในการคายประจุที่สูงกว่าและค่อนข้างคงที่ เนื่องมาจากเจลอิเล็กโทรไลต์มีอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ทำให้การตกตะกอนของตะกั่วซัลเฟตมีน้อยกว่า มีการสูญเสียอิเล็กโทรไลต์ที่น้อยกว่า การกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าจึงน้อยกว่า จึงทำให้เจลแบตเตอรี่มีสมรรถนะที่สูงกว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความจุในการคายประจุสูงกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ช่วยให้แบตเตอรี่สามารถใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มได้ดีกว่า เนื่องมาจากการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยให้ผลึกของตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นที่แผ่นขั้วมีขนาดผลึกที่เล็กกว่า ส่งผลให้การละลายของตะกั่วซัลเฟตเมื่อมีการอัดประจุกลับทำได้ง่ายกว่า และแม้แบตเตอรี่จะมีการอัดประจุแบบไม่เต็มจะทำให้เกิดการสะสมของตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นขั้ว แต่การที่ผลึกของตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กนั้น จะส่งผลให้แผ่นขั้วยังคงมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาอยู่มาก ทำให้มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า ทำให้เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความจุในการคายประจุที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ดังนั้นการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในเจลอิเล็กโทรไลต์จะช่วยให้แบตเตอรี่สามารถใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มได้ดีกว่า



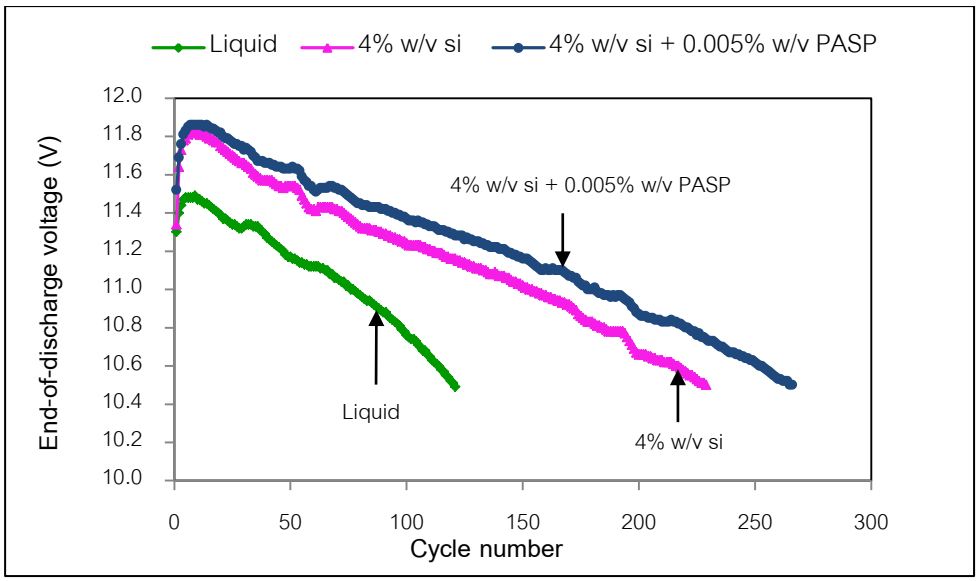
รูปที่ 4.18 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุกับจำนวนรอบการทดสอบจำนวน 36 รอบ ของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และมีภาวะการอัดประจุไม่เต็ม

4.3.4 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูงแบบกระแสคงที่ (constant current high–rate partial-state-of-charge)

ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูงแบบกระแสคงที่แสดงดังรูปที่ 4.19 เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว และเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตปริมาณร้อยละ 0.005 โดยมวล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสุดท้ายของแต่ละรอบกับจำนวนรอบในการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จนกว่าแบตเตอรี่จะมีค่าความต่างศักย์สุดท้ายเป็น 10.5 โวลต์ โดยการทดสอบนี้เป็นการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูงแบบกระแสคงที่ คือหลังจากที่แบตเตอรี่มีการอัดประจุจนเต็มในรอบแรกแล้ว แบตเตอรี่จะถูกนำไปคายประจุที่อัตราเร็วการคายประจุสูง โดยกำหนดระยะเวลาในการคายประจุคือ 5 นาที จากนั้นก็จะทำการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วสูงเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งจะเป็นการอัดประจุที่ไม่เต็มความจุของแบตเตอรี่ สังเกตจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่มีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น พิจารณาผลการทดลองพบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวจะมีค่าความ

ต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ ทำให้มีอายุการใช้งานที่ต่ำกว่า โดยแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีจำนวนรอบการใช้งานที่ต่ำที่สุด คือ 120 รอบ ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตและเติมพอลิแอสพาร์เทตมีจำนวนรอบอายุการใช้งานที่สูงกว่าคือ 229 รอบ และ 266 รอบ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าแบตเตอรี่ทั้งสามชนิดจะมีค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุที่ลดลงเมื่อจำนวนรอบในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแบตเตอรี่มีการอัดประจุไม่เต็มความจุของแบตเตอรี่ ทำให้ความต่างศักย์ในการคายประจุในรอบถัดไปลดลง และการที่ค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุของแบตเตอรี่มีการลดลงอย่างรวดเร็ว สาเหตุเนื่องจากเมื่อแบตเตอรี่มีการคายประจุที่อัตราเร็วสูง จะทำให้ตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการคายประจุเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ตะกั่วซัลเฟตเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นขั้ว ทำให้อิเล็กโทรไลต์ไม่สามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในแผ่นขั้วได้ [3] และเมื่อมีการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่โดยอัดประจุไม่เต็มความจุของแบตเตอรี่ จะทำให้มีตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นละลายออกไปไม่หมด เกิดการสะสมอยู่ที่แผ่นขั้ว และสะสมมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น [46] ส่งผลให้แบตเตอรี่สูญเสียความจุและมีค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุที่ลดลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวและเจลแบตเตอรี่ พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุที่ต่ำกว่า และมีอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ประมาณ 2 เท่า อาจเนื่องมาจากสาเหตุของการกัดกร่อนที่แผ่นขั้วร่วมด้วย กล่าวคือในกระบวนการอัดประจุที่อัตราเร็วสูง อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากการละลายของตะกั่วซัลเฟตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ขั้วไฟฟ้าเกิดการหลุดลอกตามไปด้วย รวมถึงอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในภาวะของเหลวจะมีการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าในปริมาณที่มากกว่าเจลแบตเตอรี่ จึงทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูงที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่



รูปที่ 4.19 ค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุกับจำนวนรอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง (30 นาที) แบบกระแสคงที่

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุที่สูงกว่าและมีอายุการใช้งานที่นานกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ช่วยให้แบตเตอรี่สามารถใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูงได้ดีกว่า เนื่องจากการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยให้ผลึกของตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นที่แผ่นขั้วมีขนาดผลึกที่เล็กกว่าเมื่อมีการคายประจุที่อัตราเร็วสูง ซึ่งจะไม่ไปบดบังพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่แผ่นขั้ว และอิเล็กโทรไลต์สามารถแพร่เข้าทำปฏิกิริยาที่แผ่นขั้วได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การที่ผลึกตะกั่วซัลเฟตมีขนาดเล็ก เมื่อมีการอัดประจุกลับเข้าไปในแบตเตอรี่ จะส่งผลให้การละลายของตะกั่วซัลเฟตทำได้ง่ายกว่า ทำให้เกิดการสะสมของตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นขั้วมีน้อยกว่า จะส่งผลให้แผ่นขั้วยังคงมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาอยู่มาก ทำให้มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า ทำให้เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความต่างศักย์สุดท้ายในการคายประจุที่สูงกว่าและมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ดังนั้นการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในเจลอิเล็กโทรไลต์จะช่วยให้แบตเตอรี่สามารถใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูงได้ดีกว่า

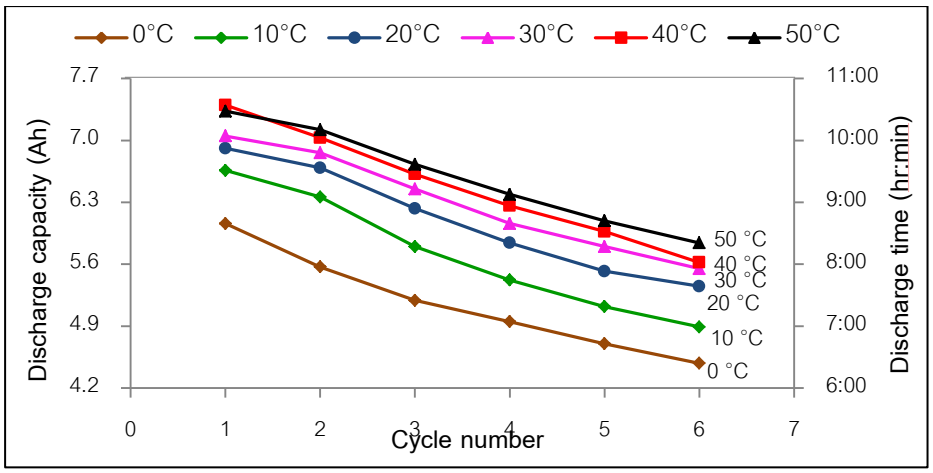
4.3.5 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิการใช้งานที่แตกต่างกัน (Temperature work)

ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิการใช้งานระหว่าง 0 – 50 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.20 โดยทำการทดสอบสมรรถนะการคายประจุที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และทดสอบเป็นจำนวน 6 รอบ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดำเนินงานของแบตเตอรี่ให้สูงขึ้น ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ทั้งสามชนิดมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะพบว่าที่อุณหภูมิการทดสอบเดียวกัน ค่าความจุของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบในการทดสอบมากขึ้น ในขณะที่เจลแบตเตอรี่จะมีค่าความจุในการคายประจุค่อนข้างคงที่เมื่อจำนวนรอบในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น สาเหตุอาจเนื่องมาจากแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่สูงกว่า จึงทำให้แบตเตอรี่มีการเสื่อมสมรรถนะที่เร็วกว่า ในขณะที่เจลแบตเตอรี่มีการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่น้อยกว่า

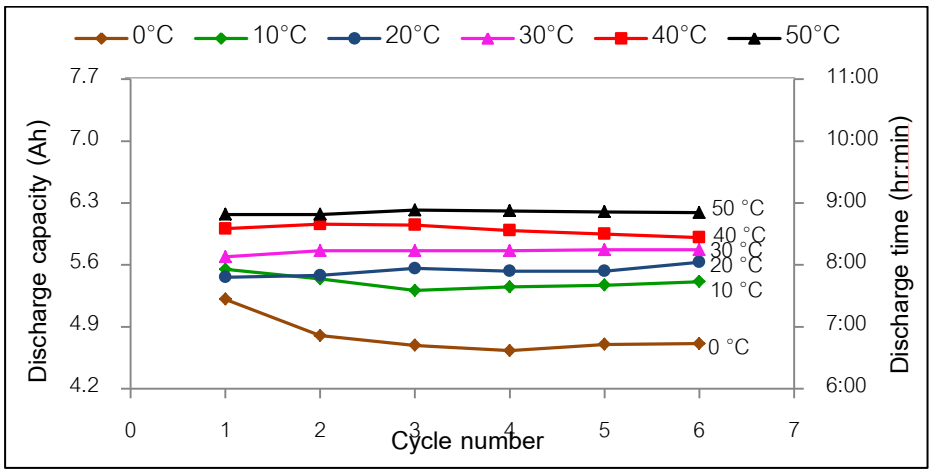
และเมื่อเปรียบเทียบค่าความจุในการคายประจุรอบสุดท้ายของแบตเตอรี่ทั้งสามชนิดกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าแบตเตอรี่ทั้งสามชนิดมีค่าความจุในการคายประจุที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ในทุกๆ ค่าอุณหภูมิที่ทดสอบ ในขณะที่เจลแบตเตอรี่จะมีค่าความจุในการคายประจุที่ใกล้เคียงกันที่การทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (0 – 20 °C) และเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้น (30 – 50 °C) ค่าความจุของเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตจะมีค่าสูงกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ดังนั้นจะเห็นอาจกล่าวได้ว่าเมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือกลางแจ้ง เจลแบตเตอรี่สามารถในการใช้งานได้ดีกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในภาวะของเหลว โดยเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตจะมีความสมรรถนะที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้งานในที่กลางแจ้งมากกว่า เช่น แบตเตอรี่ที่ใช้ในสัญญาณไฟจราจร แบตเตอรี่ที่ใช้ในเซลล์สุริยะ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าเมื่ออุณหภูมิในการดำเนินงานของแบตเตอรี่สูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง ซึ่งเมื่อใช้งานแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิการดำเนินงานเป็น -30 °C ค่าความจุของแบตเตอรี่จะลดลง 50% แต่จะมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น 60% และอายุการใช้งานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยอายุการใช้งานจะลดลงครึ่งหนึ่ง ทุกๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 8 °C จาก 25 °C [14]

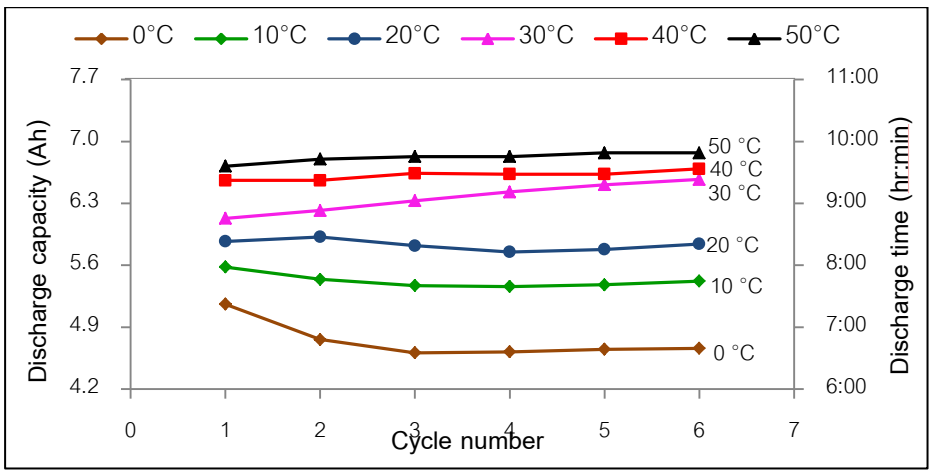
ก)



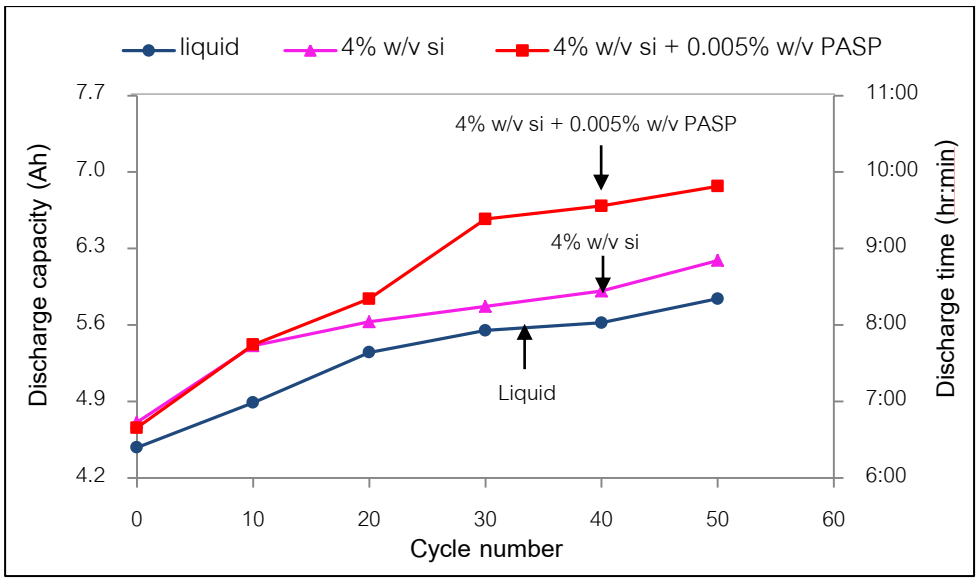
ข)



ค)



รูปที่ 4.20 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุกับจำนวนรอบการทดสอบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) อุณหภูมิการดำเนินงาน 0 – 50° C ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต



รูปที่ 4.21 ค่าความจุในการคายประจุและเวลาในการคายประจุในรอบที่ 6 ของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ กับอุณหภูมิการดำเนินงาน 0 – 50° C

4.4 การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบหลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

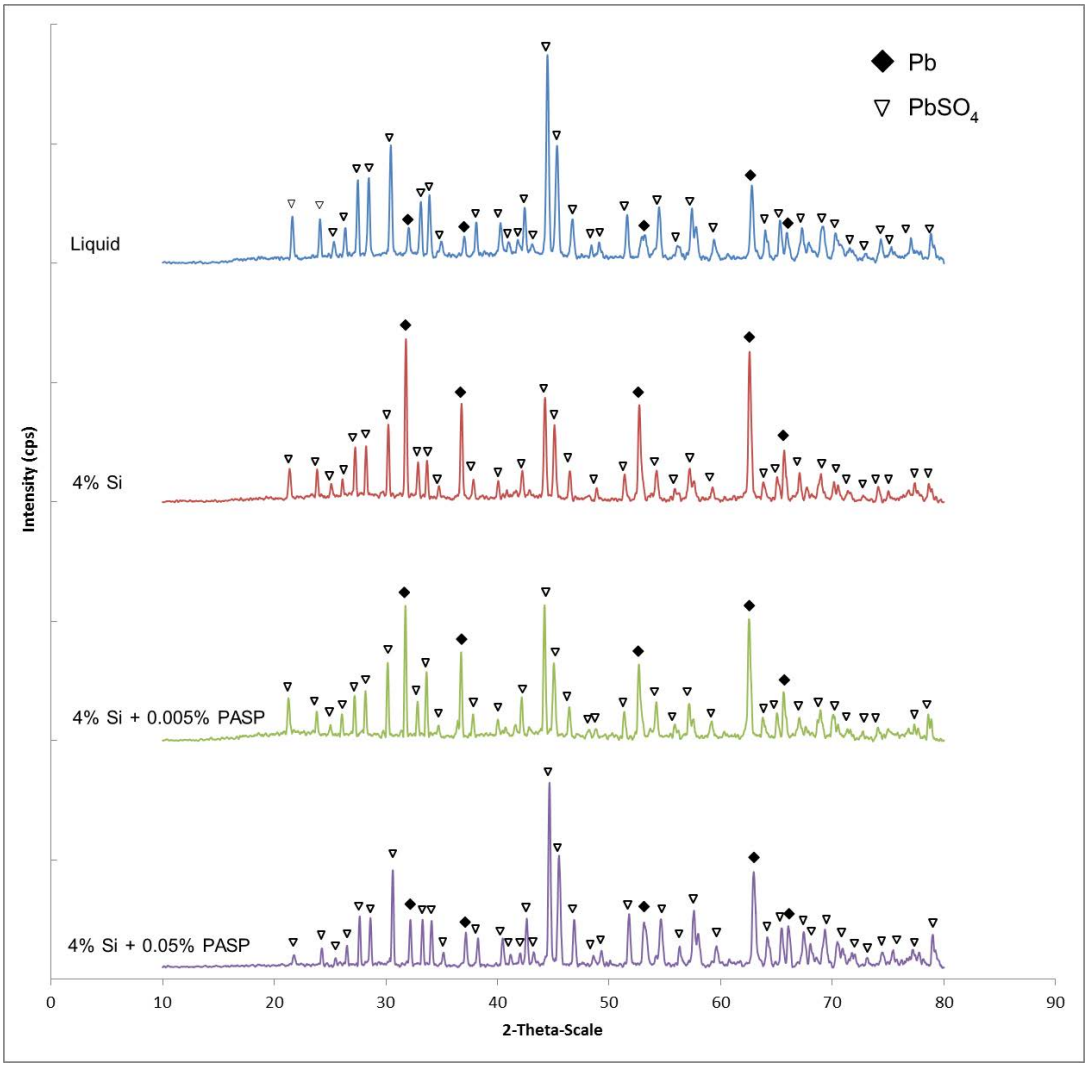
การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบจะศึกษาในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะการใช้งานของแบตเตอรี่แล้ว ได้แก่ แบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะการคายประจุภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) แบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) แบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วปกติและอัตราเร็วสูง โดยจะทำการศึกษาถึงองค์ประกอบที่เกิดขึ้นที่แผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบแล้วด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เพื่อทดสอบการเกิดปฏิกิริยาของแผ่นขั้วเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลงในอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นขั้วลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) โดยพิจารณาลักษณะทางสัณฐานที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นขั้วลบหลังการใช้งาน เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลงในอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

4.4.1 การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เป็นจำนวน 15 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจะเห็นว่าแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ทั้ง 4 ชนิด มีการตรวจพบสารประกอบเพียง 2 ชนิดเท่านั้น คือ สารประกอบของตะกั่วซัลเฟตและธาตุตะกั่วนั่นเอง เนื่องจากตะกั่วซัลเฟตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาภายในของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่แผ่นขั้วลบในขั้นตอนการคายประจุของแบตเตอรี่ (สมการ 2.15) และธาตุตะกั่วคือธาตุที่นำมาผลิตเป็นแผ่นขั้วลบ ซึ่งส่วนใหญ่จะตรวจพบสารประกอบของตะกั่วซัลเฟตได้มากกว่าธาตุตะกั่ว เนื่องจากธาตุตะกั่วได้เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.15 ไปเป็นสารประกอบตะกั่วซัลเฟตแล้วนั่นเอง โดยแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ทั้ง 4 ชนิด ไม่มีการตรวจพบสารประกอบอื่นที่แผ่นขั้ว ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเติมฟูมซิลิกาและพอลิ

แอสพาร์เทตในอิเล็กโทรไลต์ ไม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอื่นนอกเหนือจากปฏิกิริยาหลักของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

เมื่อพิจารณาเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v และ 0.05% w/v พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v มีปริมาณของผลึกตะกั่วซัลเฟตมากกว่า และมีความเป็นผลึกมากกว่า สังเกตจากพีกของตะกั่วซัลเฟตที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (รูปที่ 4.25)

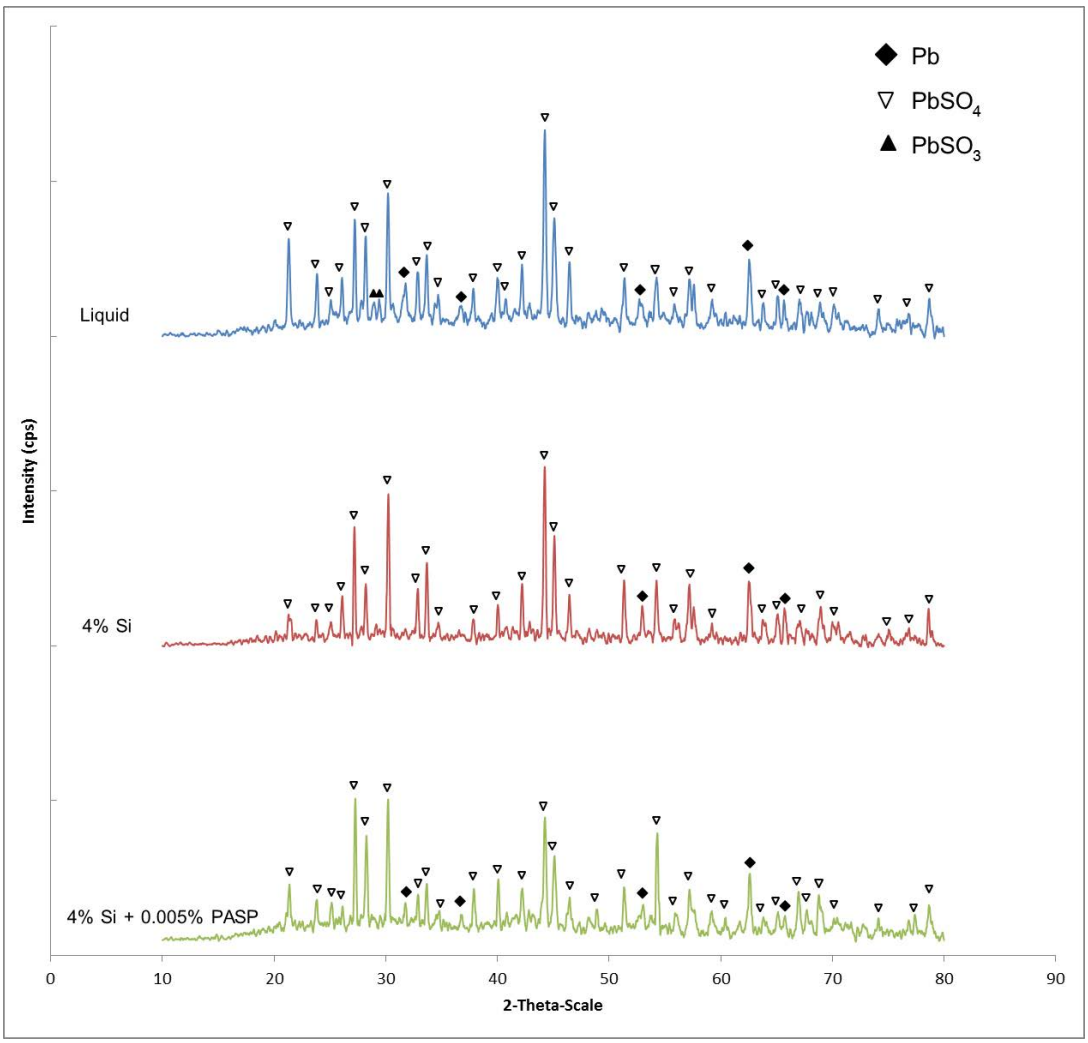


รูปที่ 4.22 รูปแบบ XRD ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะในการคายประจุภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) จำนวน 15 รอบ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

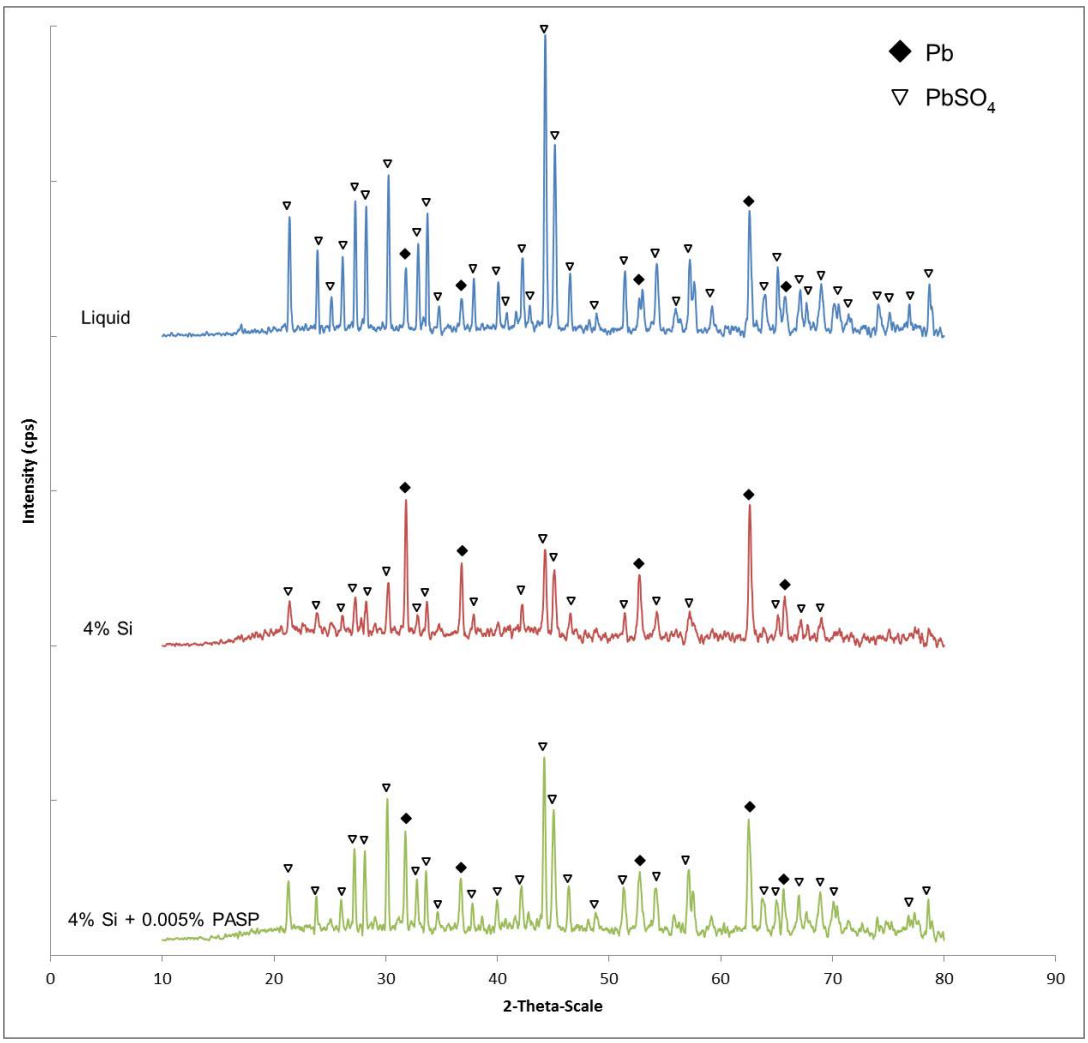
และผลการทดสอบสมบัติของแผ่นขั้วลบที่ผ่านการทดสอบอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) จำนวน 200 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.23 เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต พบว่าสารประกอบส่วนใหญ่ที่ตรวจพบในแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิดยังคงเป็นตะกั่วซัลเฟตและธาตุตะกั่ว แต่ในแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีการตรวจพบสารประกอบของตะกั่วซัลไฟต์ (Lead sulfite, $PbSO_3$) ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของตะกั่วซัลเฟตไปเป็นตะกั่วซัลไฟต์และแก๊สออกซิเจน [47] ดังสมการที่ 4.1

$$2PbSO_4 \longrightarrow 2PbSO_3 + O_2 \qquad (4.1)$$

โดยตะกั่วซัลไฟต์ที่เกิดขึ้นอาจเป็นสาเหตุให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีสมรรถนะที่ต่ำลงเมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากตะกั่วซัลไฟต์มีสมบัติการละลายที่น้อยกว่าตะกั่วซัลเฟต [48] ทำให้แบตเตอรี่สูญเสียสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาทั้งธาตุตะกั่วและซัลเฟตไอออน ทำให้แบตเตอรี่มีค่าความจุที่ต่ำลง ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ไม่มีการตรวจพบสารประกอบของตะกั่วซัลไฟต์ และเมื่อพิจารณาแผ่นขั้วลบที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูง (30 นาที) แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าสารประกอบที่ตรวจพบในแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิดยังคงเป็นสารประกอบของตะกั่วซัลเฟตและธาตุตะกั่วเท่านั้น ดังนั้นจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD สามารถสรุปได้ว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงไปในอิเล็กโทรไลต์ ไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด



รูปที่ 4.23 รูปแบบ XRD ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) จำนวน 200 รอบ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.24 รูปแบบ XRD ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูง (30 นาที) เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

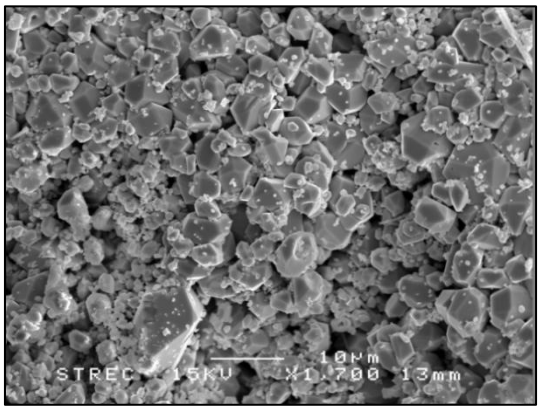
4.4.2 การศึกษาสมบัติทางสัณฐานของแผ่นขั้วลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

4.4.2.1 แบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

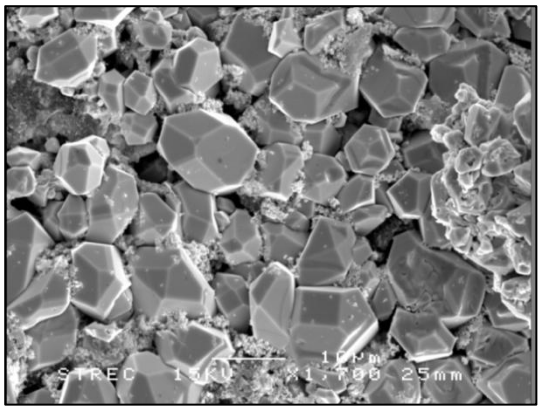
การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เป็นจำนวน 15 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าผลึกตะกั่วซัลเฟตของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว (รูปที่ 4.25 ก)) มีขนาดเล็กกว่าผลึกตะกั่วซัลเฟตของเจลแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแม้จะมีผลึกขนาดเล็กแต่ผลึกที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและมีการเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่พีกของตะกั่วซัลเฟตมีพีกที่สูงกว่า (รูปที่ 4.22) ส่งผลให้การแพร่ของซัลเฟตไอออนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในแผ่นขั้วทำได้ยากขึ้น [3] ทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลวมีค่าความจุในการคายประจุที่น้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v (รูปที่ 4.25 ค)) และ 0.05% w/v (รูปที่ 4.25 ง)) มีขนาดของผลึกตะกั่วซัลเฟตที่เล็กกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต (รูปที่ 4.25 ข)) ซึ่งการที่ผลึกตะกั่วซัลเฟตมีขนาดเล็กจะทำให้แบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุที่สูงกว่า โดยจะไม่ไปบดบังพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของแผ่นขั้ว และยังทำให้การละลายของตะกั่วซัลเฟตเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อแบตเตอรี่มีการประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ ทำให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น [5] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของสมรรถนะของแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 4.2.2.2 พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v มีค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต อาจเนื่องมาจากการเติมพอลิแอสพาร์เทตในปริมาณมาก ส่งผลให้ผลึกตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นเกิดเป็นผลึกขนาดเล็กจำนวนมากและเกิดการเกาะกลุ่มกันค่อนข้างหนาแน่น ซึ่งจะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายกับผลึกตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ซึ่งจะไปขัดขวางการแพร่ของอิเล็กโทรไลต์ที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่แผ่นขั้ว ส่งผลให้แบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v มีค่าความจุที่น้อยกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต

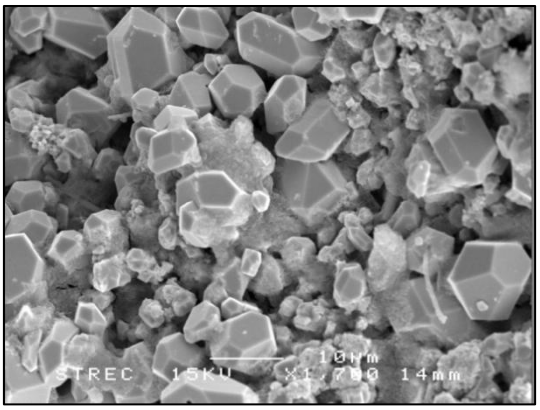
ก)



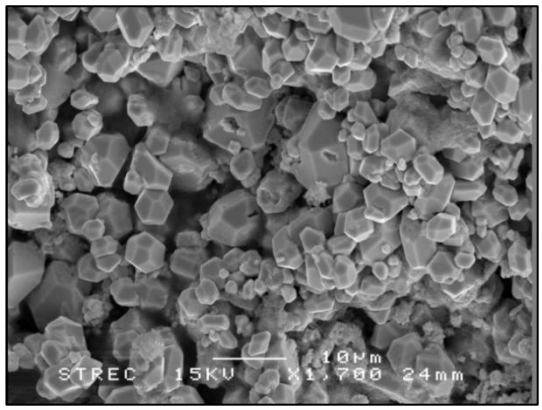
ข)



ค)



ง)

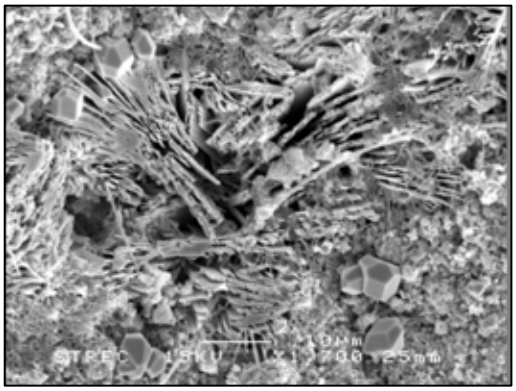


รูปที่ 4.25 รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะในการคายประจุภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) จำนวน 15 รอบ ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ง) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.05% w/v

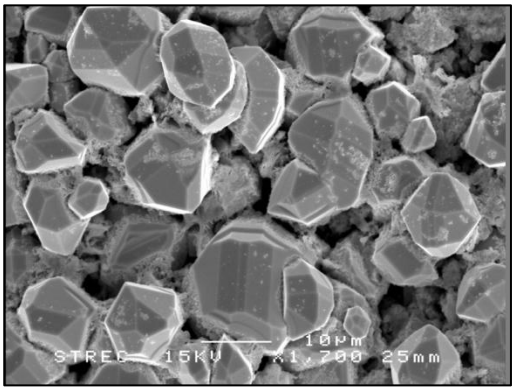
4.4.2.2 แบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) จำนวน 200 รอบ

การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตและเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ที่ผ่านการทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) เป็นจำนวน 200 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวมีการกัดกร่อนเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ก) ซึ่งเป็นสาเหตุให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าเจลแบตเตอรี่ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต (รูปที่ 4.26 ข)) มีผลึกตะกั่วซัลเฟตที่ใหญ่กว่าผลึกตะกั่วซัลเฟตของเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต (รูปที่ 4.26 ค)) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดสอบอายุการใช้งาน จะเห็นว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ผลึกตะกั่วซัลเฟตมีขนาดเล็กลง ซึ่งจะไม่ไปบดบังพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของแผ่นขั้ว ทำให้อิเล็กโทรไลต์สามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่แผ่นขั้วได้ง่ายขึ้น และยังทำให้การละลายของตะกั่วซัลเฟตเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อแบตเตอรี่มีการประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ [5] ทำให้แบตเตอรี่มีสมรรถนะในการคายประจุสูงขึ้น และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

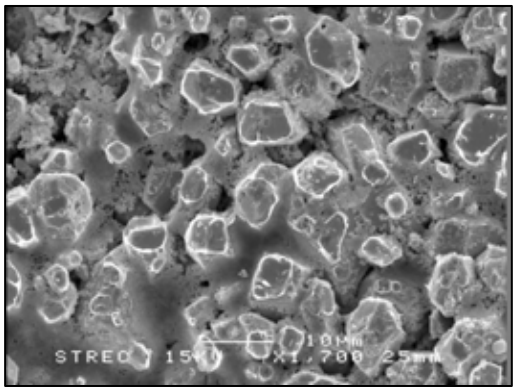
ก)



ข)



ค)



รูปที่ 4.26 รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการคายประจุหมดที่อัตราเร็วการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) จำนวน 200 รอบ ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v

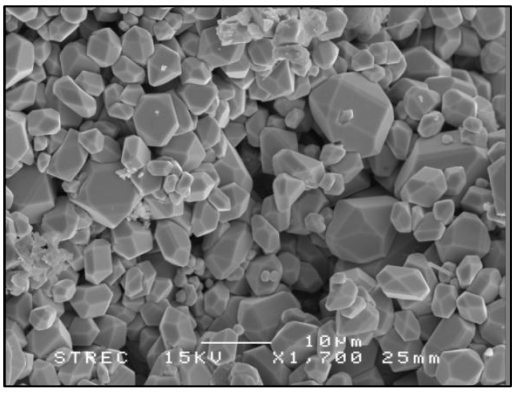
4.4.2.3 แบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม ที่อัตราเร็วปกติและอัตราเร็วสูง

การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตและเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม ที่อัตราเร็วปกติและอัตราเร็วสูง แสดงดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ พบว่าแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว (รูปที่ 4.27 ก), 4.28 ก)) ผลึกตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นมีการเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่น ส่งผลให้การแพร่ของอิเล็กโทรไลต์ที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในแผ่นขั้วทำได้ยากขึ้น [3] ทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลวมีสมรรถนะในการใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลแบตเตอรี่ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต (รูปที่ 4.27 ข), 4.28 ข)) มีขนาดผลึกตะกั่วซัลเฟตที่ใหญ่กว่าผลึกตะกั่วซัลเฟตของเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต (รูปที่ 4.27 ค), 4.28 ค)) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม ที่อัตราเร็วปกติและอัตราเร็วสูง พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีสมรรถนะในการใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่ดีกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ดังนั้นการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ผลึกตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้การละลายของตะกั่วซัลเฟตเมื่อมีการอัดประจุกลับทำได้ง่ายกว่า นอกจากนี้การที่ผลึกของตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กนั้น จะส่งผลให้แผ่นขั้วยังคงมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาอยู่มาก ทำให้มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า ทำให้เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความจุในการคายประจุที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่ยาวนานกว่า

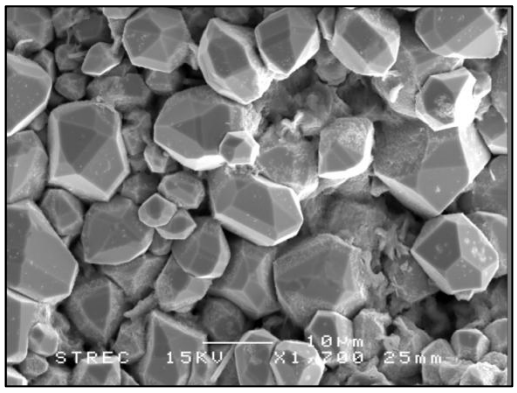
และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ชนิดเดียวกันที่มีการดำเนินงานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วต่างกัน จะเห็นว่าแบตเตอรี่ที่มีการดำเนินงานที่อัตราเร็วสูงมีขนาดของผลึกซัลเฟตที่เล็กกว่าและหนาแน่นกว่า เนื่องมาจากการที่ใช้อัตราเร็วในการคายประจุที่สูงนั้น หมายถึงการบังคับให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ไม่สามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในแผ่นขั้วได้ทันการใช้งาน ทำให้ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดที่แค่เพียงบริเวณผิวหน้าของแผ่นขั้วเท่านั้น ตะกั่วซัลเฟตที่เกิดขึ้นจึงเกิดการเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นที่

บริเวณผิวหน้าของแผ่นขั้ว [3] ซึ่งจะไปบดบังพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา ทำให้แบตเตอรี่ที่มีการใช้งานที่อัตราการคายประจุสูง มีสมรรถนะในการคายประจุที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานที่อัตราการคายประจุต่ำ

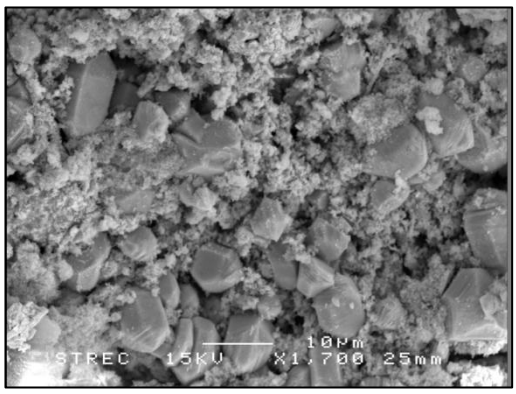
ก)



ข)

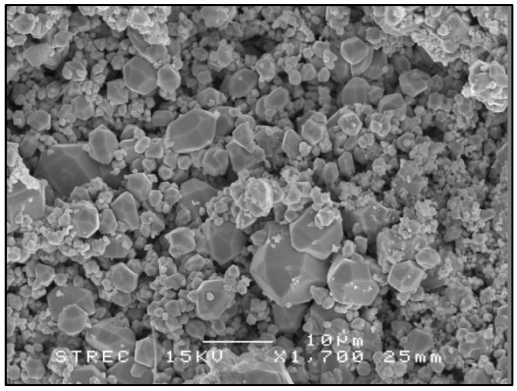


ค)

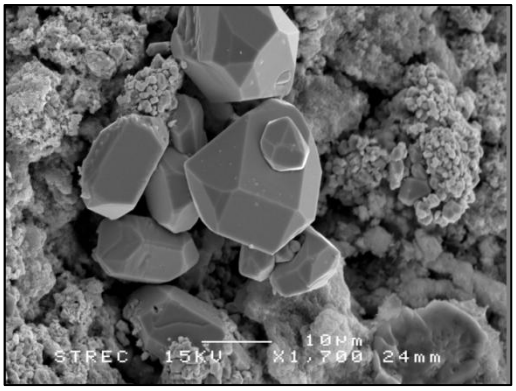


รูปที่ 4.27 รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วปกติ (10 ชั่วโมง) จำนวน 36 รอบ ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v

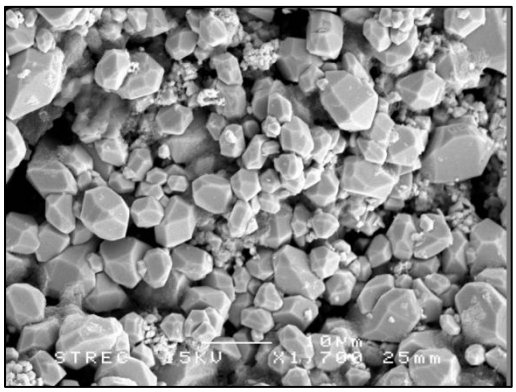
ก)



ข)



ค)



รูปที่ 4.28 รูป SEM ของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ หลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วสูง (30 นาที) ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ค) เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของพอลิแอสพาร์เทตต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม ในส่วนแรกทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตในอิเล็กโทรไลต์เหลว ส่วนที่สองทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยศึกษาผลของปริมาณฟูมซิลิกา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณพอลิแอสพาร์เทต ซึ่งพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ทดสอบระยะเวลาการเกิดเจลและความแข็งของเจล และทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำและสูง และทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง เพื่อพิจารณาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นในส่วนที่สามทำการศึกษาสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่เตรียมจากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเหมาะสมที่สุดในภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน พิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ สมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม สมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง และสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆ และในส่วนสุดท้ายศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบหลังการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค SEM และ XRD ผลการทดลองต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

1. สารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์เหลว ไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ แต่ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดได้ยากขึ้น และมีอัตราการเกิดที่ต่ำลง โดยการเติมทั้งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์เหลวส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดได้ยากกว่า และมีอัตราการเกิดที่ต่ำกว่าอิเล็กโทรไลต์เหลวที่เติมโซเดียมเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตส่งผลให้แบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุสูงขึ้นร้อยละ 5.04 และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.63 และการเติมโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียวส่งผลให้แบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุใกล้เคียงกับอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง แต่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.44 ทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ในขณะที่การเติมโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทตส่งผลให้แบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุสูงขึ้นร้อยละ 19.28 และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.35 และการเติมโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียวส่งผลให้

แบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุสูงขึ้นร้อยละ 10.76 แต่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.88 ทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ดังนั้นการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและพอลิแอสพาร์เทต จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์

2. ปริมาณฟูมซิลิกาที่เพิ่มขึ้นและอัตราเร็วที่มากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้นลง และความแข็งของเจลมากขึ้น การเติมพอลิแอสพาร์เทตส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล โดยระยะเวลาการเกิดเจลจะนานขึ้น และความแข็งของเจลลดลง แต่ปริมาณพอลิแอสพาร์เทตที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการเกิดเจลสั้นลง และความแข็งของเจลมากขึ้น

3. การเติมฟูมซิลิกาลงในอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ แต่ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดได้ยากขึ้น และมีอัตราการเกิดที่ต่ำลง โดยปริมาณฟูมซิลิกาที่มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง ในขณะที่อัตราเร็วในการกวนไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ และไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ปริมาณพอลิแอสพาร์เทตไม่ส่งผลต่อความยากง่ายของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน แต่จะส่งผลให้อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงเพียงเล็กน้อย

4. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที ให้ค่าความจุในการคายประจุสูงที่สุด สำหรับเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่สูงที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ภาวะการเตรียมเจลที่เหมาะสมที่สุดคือ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วในการกวน 2,000 รอบต่อนาที และเติมพอลิแอสพาร์เทต 0.005% w/v โดยสมรรถนะของเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทต จะให้ค่าความจุในการคายประจุสูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต ทั้งที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำและสูงร้อยละ 4.33 และ 10.09 ตามลำดับ

5. เจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความจุประจุคงเหลือหลังการเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือนที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และยังสูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว โดยเหลือค่าความจุร้อยละ 89 87 และ 85 ตามลำดับ และเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่หลังการเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือน เมื่อนำมาทดสอบสมรรถนะการคายประจุที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะเหลว ดังนั้นการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในแบตเตอรี่จะช่วยให้แบตเตอรี่มีอัตราการคายประจุด้วยตัวเองที่น้อยลง

6. การทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ภาวะการคายประจุหมด ที่อัตราเร็วในการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความจุในการประจุที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตและแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ดังนั้นเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตจึงมีอายุการใช้งานที่นานกว่า

7. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็ม ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีค่าความจุในการคายประจุที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตและแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ดังนั้นเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตสามารถใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มได้ดีกว่า

8. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูง (30 นาที) แบบกระแสคงที่ พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตและแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว ดังนั้นเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตสามารถใช้งานภายใต้ภาวะการอัดประจุไม่เต็มที่อัตราการคายประจุสูง (30 นาที) แบบกระแสคงที่ได้ดีกว่า

9. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆ พบว่าทั้งเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตและไม่เติมพอลิแอสพาร์เทต และแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่จะสูงขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เติมพอลิแอสพาร์เทตจะให้ค่าความจุประจุที่สูงที่สุด รองลงมาคือเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมพอลิแอสพาร์เทตและแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะของเหลวตามลำดับ

10. การศึกษาสมบัติของแผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่หลังการทดสอบสมรรถนะ พบว่าการเติมพอลิแอสพาร์เทตลงในอิเล็กโทรไลต์ ไม่ส่งผลให้เกิดสารประกอบอื่นที่แผ่นขั้วลบของแบตเตอรี่ แต่ส่งผลให้ผลึกของตะกั่วซัลเฟตมีขนาดเล็กลง ทำให้แบตเตอรี่มีสมรรถนะในการใช้งานที่ภาวะต่างๆ สูงขึ้น

5.2 **ข้อเสนอแนะ**

การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่ค่อนข้างนาน และอุปกรณ์การทดสอบมีจำกัด ทำให้การทดลองบางส่วนต้องมีการทดสอบในรอบการใช้งานที่สั้น นอกจากนี้ยังทำให้ไม่สามารถทำการทดลองซ้ำได้ ข้อมูลที่ได้จึงอาจไม่แม่นยำ ดังนั้นหากการทดลองบางส่วนสามารถทดสอบในจำนวนรอบที่นานขึ้น และสามารถทำการทดลองซ้ำได้ งานวิจัยนี้จะมีความสมบูรณ์และแม่นยำมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

[1] Yan, J. H., W. S. Li and Zhan Q. Y. Failure mechanism of valve-regulated lead–acid batteries under high-power cycling. J. Power Sources 133 (2004): 135-140.

[2] Bulluck, K. R. Lead/acid batteries. J.Power Sources 51 (1994): 1-17.

[3] Lam, L.T., Haigh, N.P., Phyland, C.G., Urban, A.J. Failure mode of valve-regulated lead-acid batteries under high-rate partial-state-of-charge operation. J. Power Sources 133 (2004): 126–134.

[4] Lambert, D.W.H., Greenwood, P.H.J., Reed, M.C. Advance in gelled-electrolyte technology for valve-regulated lead-acid batteries. J. Power Sources 107 (2002): 173-179.

[5] Petkova, G., Nikolov, P., Pavlov, D. Influence of polymer additive on the performance of lead-acidbattery negative plates. J. Power Sources 158 (2006): 841–845.

[6] Bode, H., Lead-acid batteries, United State of America, John Wiley & Sons, 1977

[7] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หลักสูตรฝึกอบรมเทคนิคการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ใช้งานระบบ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.are101.org/book/solarcell-training/04Operator.pdf [2553, มกราคม 27].

[8] Linden, D. Handbook of batteries. United States of America: McGraw-Hill, 1995.

[9] Berndt, D. Maintenance-free batteries lead-acid, nickel/cadmium, nickel/hydride a handbook of battery technology. Great Britain: John Wiley & Sons, 1993.

[10] Derek, P. Industrial electrochemistry. United States of America: Chapman and hall, 1982.

[11] Berndt, D. Maintenance-free batteries based on aqueous electrolyte lead-acid, nickel/cadmium, nickel/hydride a handbook of battery technology. Great Britain: John Wiley & Sons, 2003.

[12] Bagotsky, V.S. Fundamentals of electrochemistry. Great Britain: John Wiley & Sons, 2005.

[13] Sunnyway battery. Discharge Characteristics [online]. Available from: http://www.sunnyway-battery.com/support02-Discharge Characteristics.htm [2012, March 3].

[14] Northern Arizona Wind & Sun. Deep Cycle Battery FAQ [online]. Available from: http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm [2012, March 3].

[15] David, G. batteries [online]. Available from: http://www.scribd.com/doc/56981404/The-Avionics-Handbook-Cap-10 [2012, March 3].

[16] กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น กระทรวงมหาดไทย, ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thailocaladmin.go.th/work/e_book/eb1/std210550/3/2.pdf [2555, มีนาคม 5].

[17] The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living. Lead-acid battery [online]. Available from: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/L/AE_lead-acid_battery.html [2012, March 5].

[18] BD battery. Battery Types and Comparisons [online]. Available from: http:// www.bdbatteries.com/batterycomparison.php [2012, March 5].

[19] Martha, S.K., Hariprakash, B., Gaffoor, S.A., and Shukla, A.K. Performance characteristics of a gelled-electrolyte valve-regulated lead-acid battery. Bulletin of Material Science 26 (2003): 465-469.

[20] NELSON, R. F. EVOLUTION OF GAS-RECOMBINATION LEAD/ACID CELLS AND BATTERIES. J. Power Sources 31 (1990): 3-22.

[21] Kumar, R., Sekhon, S. S. Conductivity modification of proton conducting polymer gel electrolytes containing a weak acid (ortho-hydroxy benzoic acid) with the addition of PMMA and fumed silica. J. Appl Electrochem 39 (2009): 439-445.

[22] IEEE guide for selection of valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries for stationary applications [online]. Available from: http://ieeexplore .ieee.org/stamp/ stamp.jsp? arnumber=00531501 [2012, March 6].

[23] Rusch, W., Vassallo, K. and Hart G. Understanding the real differences between gel and AGM batteries [Online]. Available from: http://www.battcon.com/ paperfinal 2007/rushpaper2007.pdf [2012, March 6].

[24] Hariprakash, B., Gaffoor, S.A., Shukla, A.K. Lead-acid batteries for partial-state-of-charge applications. J. Power Sources 191 (2009): 149–153.

[25] Hernández, J.C., Soria, M.L., González, M., García-Quismondo, E., Muñoz, A., Trinidad, F. Studies on electrolyte formulations to improve life of lead acid batteries working under partial state of charge conditions. J. Power Sources 161 (2006): 851–863.

[26] Torcheux, L., Rouvet, C., Vaurijoux, J.P. Effect of a special additive on the performance of standby valve-regulated lead acid batteries. J. Power Sources 78 (1999): 147–155.

[27] Antonio, L. Battery additives: any influence on separator bahavior?. J. Power Sources 95 (2001): 255-263.

[28] Karimi, M.A., Karami, H., Mahdipour, M. Sodium sulfate as an efficient additive of negative paste for lead-acid batteries. J. Power Sources 160 (2006): 1414-1419.

[29] Safari Yazd, M., Molazem i, A., Moayed, M.H. The effects of different additives in electrolyte of AGM batteries on self-discharge. J. Power Sources 158 (2006): 705-709.

[30] A Green Chemistry Module. Thermal Polyaspartate as a Biodegradable Alternative to Polyacrylate and Other Currently Used Water Soluble Polymers [online]. Available from: http://academic.scranton.edu/faculty/cannm1/polymer/polymermodule.html [2012, March 6].

[31] Roweton, S., Huang, SJ., Swift, G. Poly(aspartic Acid): Synthesis, Biodegradation, and Current Applications. J. Environmental Polymer Degradation 5 (1997): 175-181.

[32] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

[33] ลาวัลย์ ศรีพงษ์. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. นครปฐม: คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2543.

[34] มหาวิทยาลัยมหิดล. โวแทมเมทรี [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/anal_votammetry3.htm [2555, มีนาคม 7].

[35] Swapp, S. Scanning Electron Microscopy (SEM) [Online]. Available from: http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html [2012, March 7].

[36] Scanning Electron Microscopy (SEM) [Online]. Available from: http://www.nhml.com/resources/1998/10/1/scanning-electron-microscopes-sem [2012, March 7]

[37] Whiston, C. Analytical chemistry by open learning X-ray method. London, UK: John Wiley & Sons, 1987.

[38] Template X-ray [Online]. Available from: http://www.teachnet.ie/dkeenahan/page21.html [2012, March 7]

[39] Park, J., Park, S.B., Yang, S.M., Hong, W.H., Choi, C.R., Kim, J.H., Rheological characterization and optimization of gelled electrolyte for seal lead-acid batteries by small amplitude dynamic oscillation measurement. J. Non-Cryst. Solids 351 (2005): 2352-2357.

[40] Tang Z, Wang JM, Mao XX, Chen QQ, Chen Shen, Zhang JQ. Application of a novel gelled-electrolyte in valve-regulated lead-acid batteries with tubular positive plates. J. Appl Electrochem 37 (2007): 1163-1169.

[41] Chen M.Q., Chen H.Y., Shu D., Li A.j., Finlow D.E. Effects of preparation condition and particle size distribution on fumed silica gel valve-regulated lead–acid batteries performance. J.Power Sources 181 (2008): 161–171.

[42] Yonglang, G., Junmei, H., Mingxiang, H. Investigations on self-discharge of gel valveregulated lead–acid batteries. J. Power Sources 158 (2006): 991-996.

[43] Japanese industrial standard. JIS C 8702-1, Small-size valve regulated lead – acid batteries Plate 1: General requirements, functional characteristics Methods of test.

[44] Kung long batteries industrial Co,.Ltd. Gel Batteries Technical Manual [online]. Available from: http://www.elv-downloads.de/.../manuals.../71974_Blei_Gel_Akku_UMenglisch.pdf [2012, January 20].

[45] Tang, Z., Wang, J.M., Mao, X.X., Shao, Hb., Chen, Q.Q., Xua, Z., Zhang, J.Q. Investigation and application of polysiloxane-based gel electrolyte in valve-regulated lead-acid battery. J. Power Sources 168 (2007): 49–57.

[46] Takeuchi, T., Sawai, K., Tsuboi, Y. Masashi Shiota, M.H., Ishimoto, S.J., Hirai, N., Osumi,S.H. The partial state-of-charge cycle performance of lead-acid batteries. J. Power Sources 189 (2009) 1190–1198.

[47] Cavalcade o' Chemistry, Types of Reactions Worksheet [online]. Available from: misterguch.brinkster.net/PRA020.pdf [2012, May 1].

[48] Dr. Tibor Pasinszki, The Group Ia Elements (Li, Na, K, Rb, Cs) and Their Principle Ions (Me^{+}) [online]. Available from: www.inc.bme.hu/en/subjects/inchem/sillabus/7-35.pdf [2012, May 1].

[49] MK battery co., Ltd, The sealed Battery Specialists [online]. Available from: www.homewind.net/pdf/products/23974_1.pdf [2012, January 20].

[50] NARADA POWER SOURCE CO., LTD. VALVE REGULATED TUBULAR GEL BATTERY OPERATION MANUAL [online]. Available from: http://www.elv-downloads.de/.../manuals.../71974_Blei_Gel_Akku_UMenglisch.pdf [2012, January 20].

[51] Mastervolt BV CO., LTD, USERS MANUAL 12 V GEL BATTERY [online]. Available from: www.suremarine.com/manuals/assorted-information/mastervolt-gel-batt.pdf [2012, January 20].

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. การเตรียมกรดซัลฟิวริก

ต้องการเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความถ่วงจำเพาะ 1.325 (เป็นความเข้มข้นที่ใช้ในโรงงาน) จำนวน 1,000 มิลลิลิตร จากตารางที่ 2.4 เทียบเป็นความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 5.8 โมลต่อลิตร โดยเตรียมสารละลายจากกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 18.0 โมลต่อลิตร

จากสมการ $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกก่อนเจือจาง (โมลต่อลิตร)
C_2 คือ ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกที่ต้องการเตรียม (โมลต่อลิตร)
V_1 คือ ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ต้องใช้ (มิลลิลิตร)
V_2 คือ ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ต้องการเตรียม (มิลลิลิตร)

แทนค่าข้อมูลการทดลอง

$$18.0(V_1) = 5.8(1000)$$
$$V_1 = 322.22 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น จะต้องใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 18.0 โมลต่อลิตร จำนวน 322.22 มิลลิลิตร

2. การหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ในแต่ละรอบการใช้งานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 เช่น ในเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 %w/v ที่อัตราการกวน 2,000 รอบต่อนาที ได้ค่าในการทดสอบดังนี้

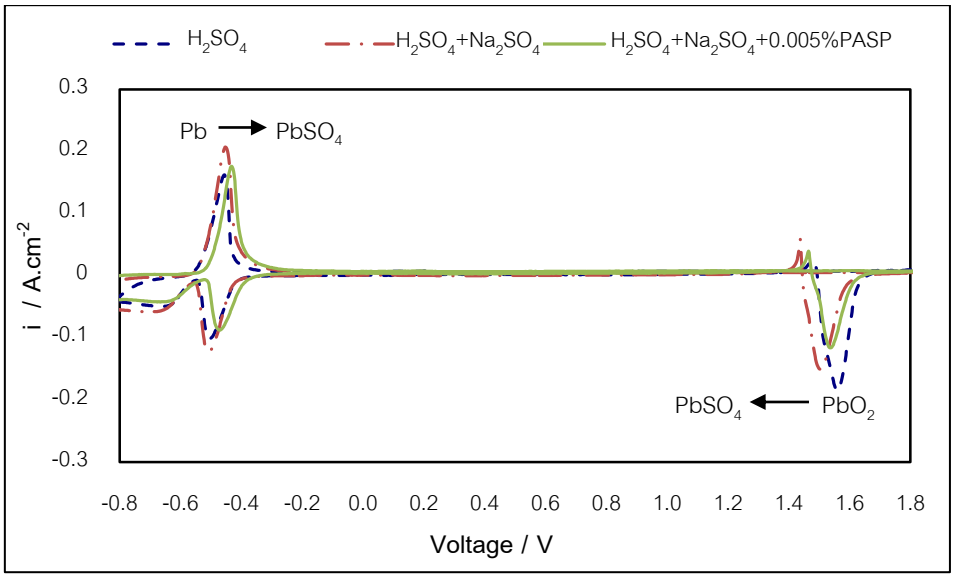
Number of cycle	Charge (Ah)	Discharge (Ah)
1	4.59	4.26
2	4.47	4.25
3	**4.41**	**4.26**

ต้องการคำนวณหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ในรอบที่ 3 สามารถคำนวณได้ ดังนี้

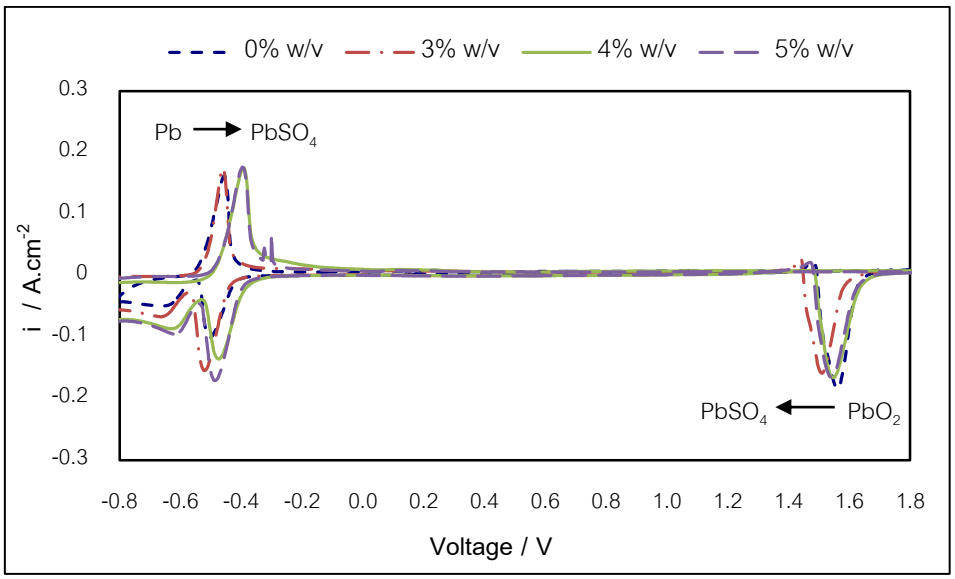
ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ = (4.26/4.41) x 100

= 96.58 %

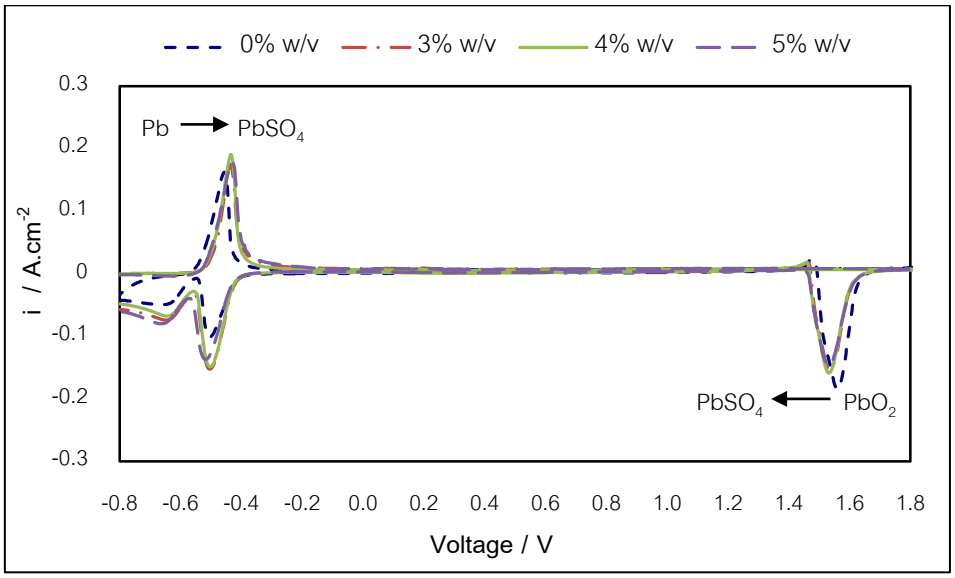
ภาคผนวก ข
กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรี



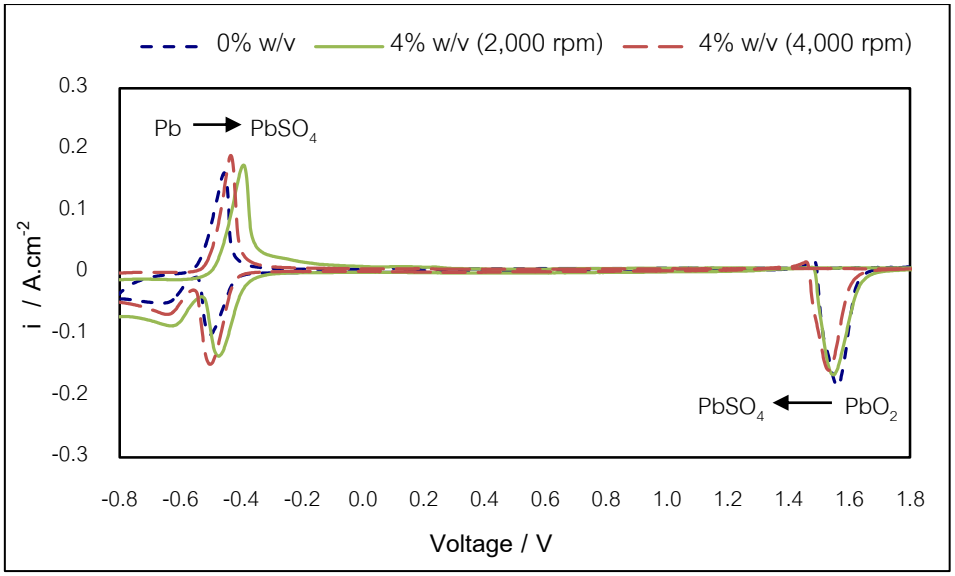
รูปที่ ข.1 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.1) เปรียบเทียบกรดซัลฟิวริกที่เติมสารเติมแต่งและไม่เติมสารเติมแต่ง



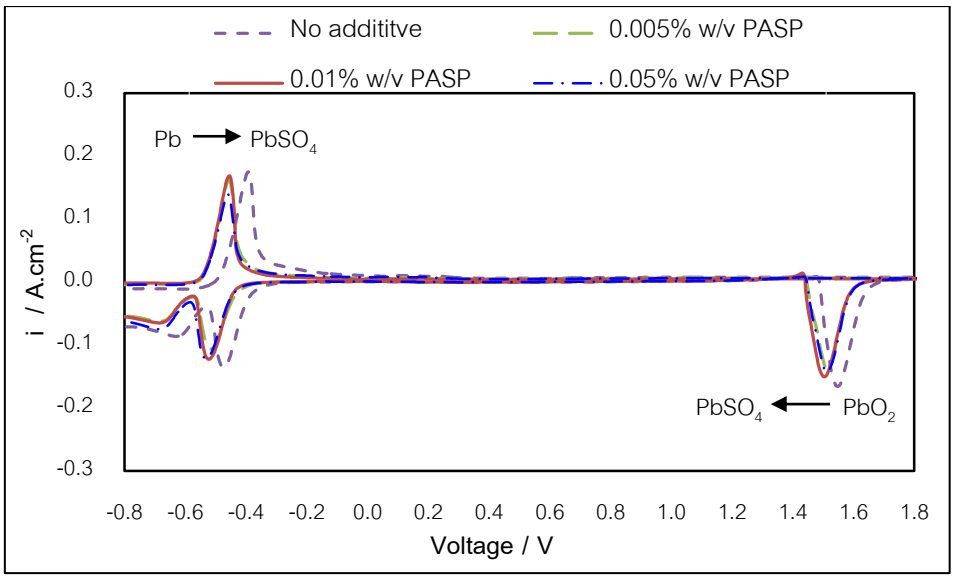
รูปที่ ข.2 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.5) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที



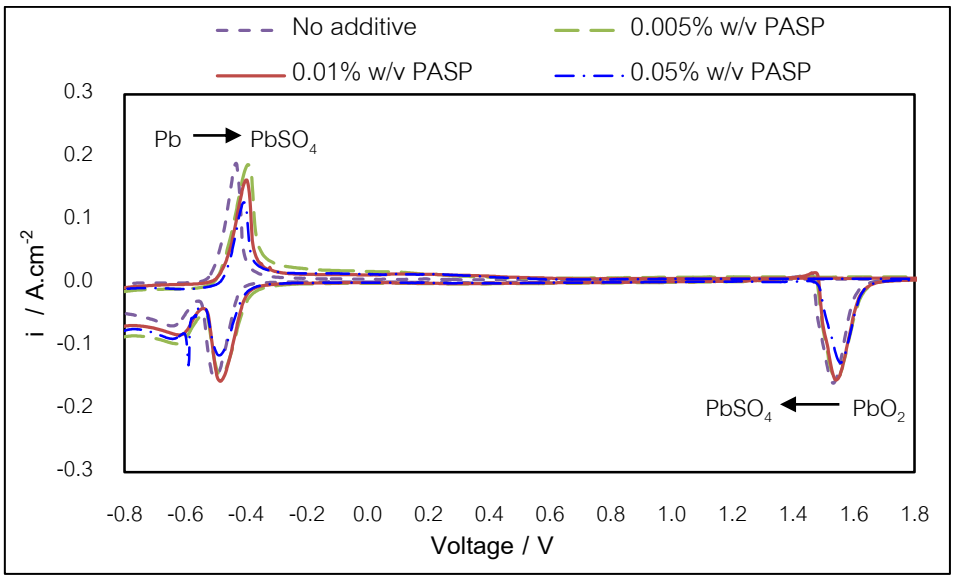
รูปที่ ข.3 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.6) เปรียบเทียบฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที



รูปที่ ข.4 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.7) เปรียบเทียบฟูมซิลิกา 4% w/v ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 และ 4,000 รอบต่อนาที



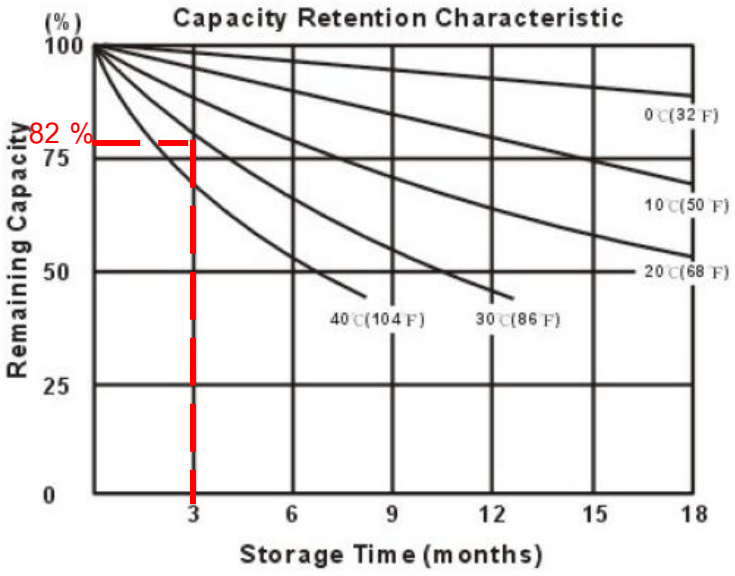
รูปที่ ข.5 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.8) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 2,000 รอบต่อนาที



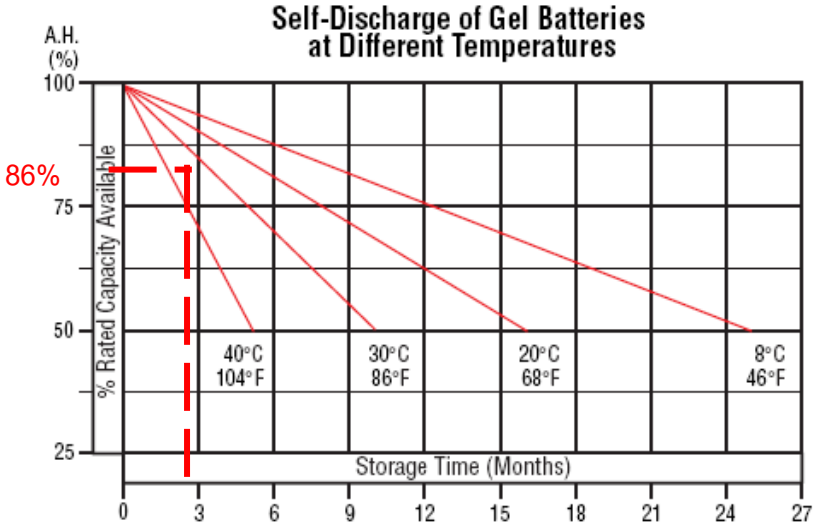
รูปที่ ข.6 กราฟขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV รูปที่ 4.9) เปรียบเทียบพอลิแอสพาร์เทตปริมาณต่างๆ ที่อัตราเร็วการกวน 4,000 รอบต่อนาที

ภาคผนวก ค
คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าและที่ใช้ทดสอบ

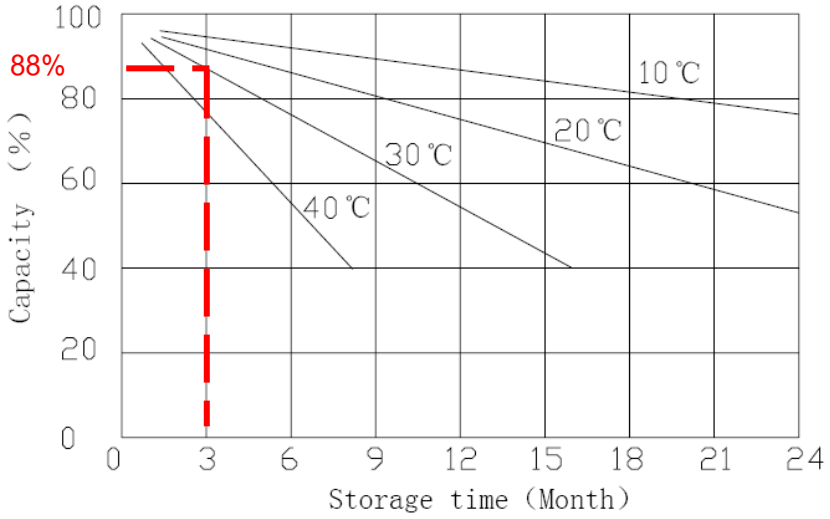
1. แบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้า



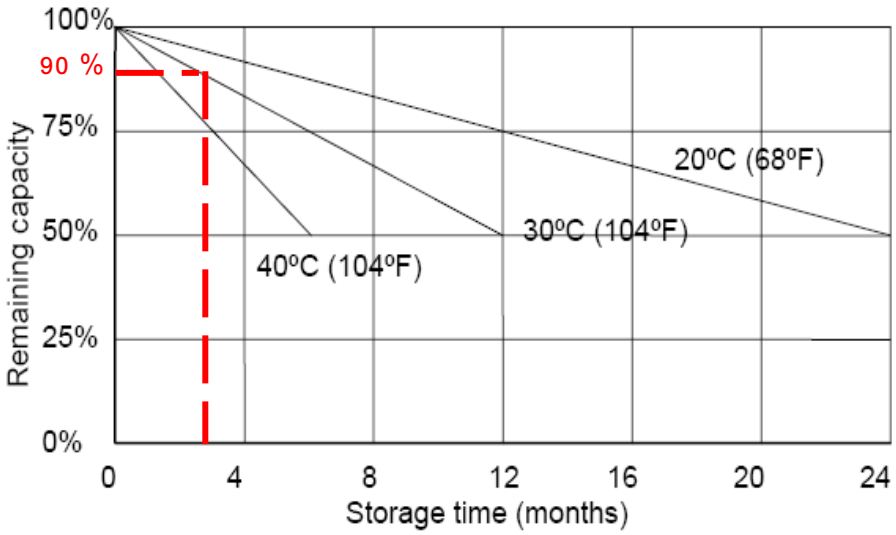
รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท Kung Long Batteries Industrial [44]



รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท MK battery [49]



รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท Narada Power Source [50]



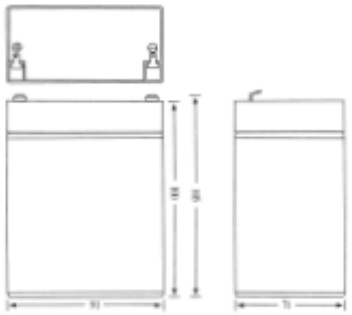
รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท MASTERVOLT [51]

2. แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบ

HGL4.0 -12 Valve Regulated Sealed Lead-Acid Battery

LION®

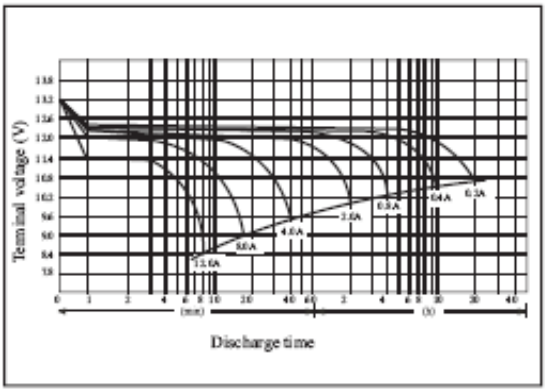
Dimensions (mm)



Specifications

Nominal Voltage		12 V
Rated Capacity (20 hours rate)		4.0Ah
Dimensions (± 2mm)	Total Height (with terminals)	105mm
	Length Width Height	91mm 71mm 100mm
Approx. Weight		1.64kg
Standard Terminal		F1

Discharge Characteristics

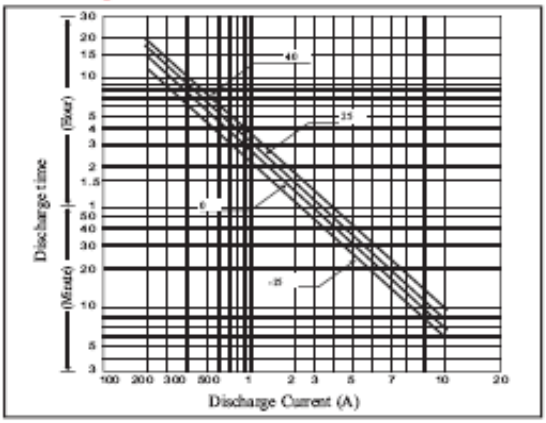


Characteristics

Capacity (25°C)	20 hour rate (200mA) 10 hour rate (372mA) 5 hour rate (680mA) 1 hour rate (2.3A)		4.0AH 3.7AH 3.4AH 2.3AH
Internal Resistance	Fully charged Battery 25°C		Approx. 35m
Capacity affected by temperature (20 hour rate)	40°C 25°C 0°C -15°C		102% 100% 85% 65%
Self Discharge (25°C)	Capacity after 3 months storage Capacity after 6 months storage Capacity after 12 months storage		92% 83% 65%
Charge Method (Constant Voltage)	Cycle use	Initial Current	1.20A or smaller
		Control Voltage	14.4 to 15.0V (25°C)
	Standby use	Initial Current	1.20A or smaller
		Control Voltage	13.5 to 13.8V (25°C)

* The above data are average and obtained within three charge/discharge cycles. Cycles not the minimum values.

Discharge current & Duration Time



LION®

SLA BATTERY
GT7.2-12
12V7.2AH

Gel Series

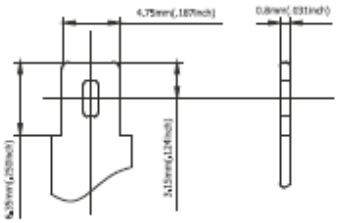
Lion Gel series batteries are designed to meet the requirements of frequent cyclic and high temperature applications such as broadband, PVs etc through up-to-date gel technologies. Lion Gel batteries uses German origin high punty fumed silica to form sulfuric acid thixotropic Gel and fills to the batteries with vacuum to ensure the fully penetration of electrolyte through separators and plates pastes.

Application

- Alarm System
- Cable Television
- Communication Equipment
- Control Equipment
- Security System
- Medical Equipment
- UPS
- Power tools
- Emergency Power System
- Toys

General Features

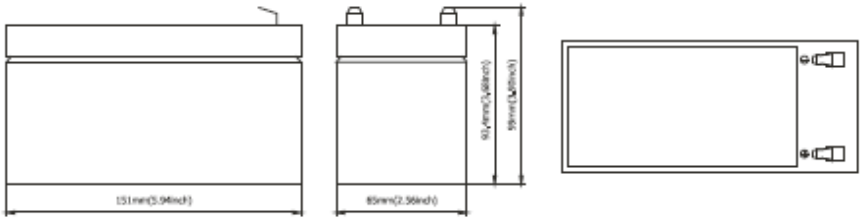
- Sealed and maintenance free operation.
- Non-Spillable construction design.
- ABS containers and covers(UL94HB, UL94V-0) optional.
- Safety valve installation for explosion proof.
- High quality and high reliability.
- Exceptional deep discharge recovery performance.
- Low self discharge characteristic.
- Flexibility design for multiple install positions.



Terminal Dimensions

Construction

- Component .....Raw material
- Positive .....Lead dioxide
- Negative .....Lead
- Container .....ABS
- Cover .....ABS
- Sealant .....Epoxy Resin
- Safety valve .....EPDR
- Terminal .....Copper
- Separator .....AGM
- Electrolyte .....sulfuric acid thixotropic Gel



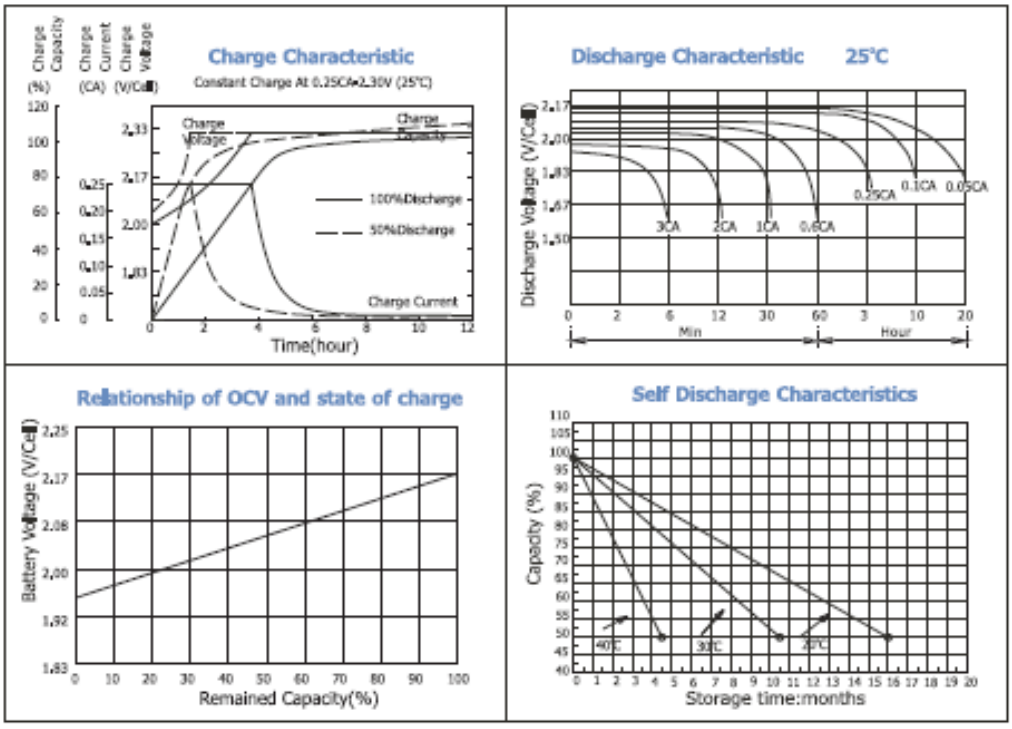
Battery Model	GT7.2-12 (MP7.2-12V)			
Designed Life	8 Years (Floating) or > 750 Cycles @ 50% D.O.D			
Capacity(25℃)		10HR(0.7A,1.75V)	5HR(1.23A,1.75V)	1HR(4.68A,1.75V)
	7.2AH	7AH	6.15AH	4.68AH
Dimensions	Length	Width	Height	Total Height
	151mm(5.94inch)	65mm(2.56inch)	93.4mm(3.68inch)	99mm(3.90inch)
Approx. Weight	2.4Kg (5.29 lbs)			
Internal Resistance	Full charged at 25℃: 0.02 Ohm			
Self Discharge	3% of capacity declined per month at (25℃)			
Capacity Affected by Temp.(20HR)	40℃	25℃	0℃	-15℃
	102%	100%	85%	65%
Charge Voltage(25℃)	Cycle use		Float use	
	14.4-15V(-30mV/ ℃), max. Current: 2.1A		13.6-13.8V(-20mV/ ℃)	

LION®

SLA BATTERY

GT7.2-12

12V7.2AH



Constant current discharge ratings-amperes at 25°C

F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	3HR	5HR	10HR	20HR
1.60V	28.1	17.5	13.2	8.05	5.12	2.25	1.37	0.77	0.40
1.67V	26.4	16.6	12.7	7.70	5.05	2.16	1.34	0.76	0.39
1.70V	24.2	16.0	12.4	7.00	4.90	2.02	1.32	0.76	0.38
1.75V	23.7	15.5	12.0	6.65	4.67	1.95	1.29	0.75	0.37
1.80V	21.2	14.8	10.9	6.16	4.37	1.87	1.21	0.74	0.36
1.85V	18.7	14.1	9.8	5.67	4.07	1.80	1.13	0.73	0.35

Constant power discharge ratings-watts at 25°C

F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	3HR	5HR	10HR	20HR
1.60V	49.3	31.6	24.1	14.5	9.24	3.98	2.32	1.54	0.81
1.67V	47.6	30.8	23.8	14.2	9.18	3.86	2.31	1.53	0.78
1.70V	44.8	30.5	23.6	13.3	9.00	3.69	2.28	1.52	0.77
1.75V	45.1	30.4	23.4	12.9	8.85	3.60	2.26	1.50	0.75
1.80V	41.3	30.0	21.7	12.3	8.34	3.49	2.19	1.48	0.73
1.85V	37.4	28.4	19.7	11.5	7.84	3.39	2.12	1.46	0.70

LION®

SLA BATTERY
GT7.2-12
12V7.2AH

Gel Series

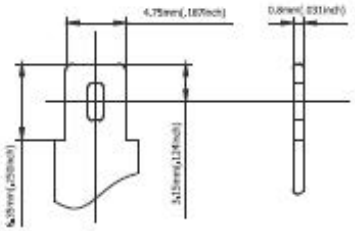
Lion Gel series batteries are designed to meet the requirements of frequent cyclic and high temperature applications such as broadband, PVs etc through up-to-date gel technologies. Lion Gel batteries uses German origin high purity fumed silica to form sulfuric acid thixotropic Gel and fills to the batteries with vacuum to ensure the fully penetration of electrolyte through separators and plates pastes.

Application

- Alarm System
- Cable Television
- Communication Equipment
- Control Equipment
- Security System
- Medical Equipment
- UPS
- Power tools
- Emergency Power System
- Toys

General Features

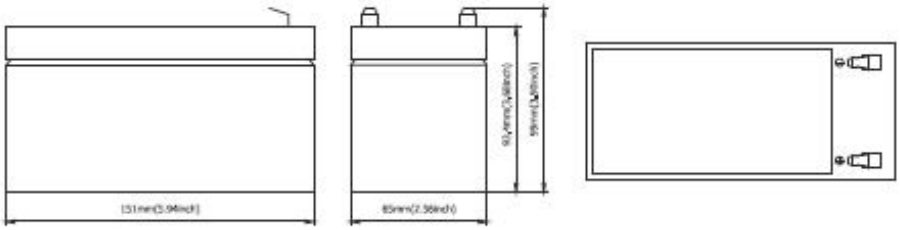
- Sealed and maintenance free operation.
- Non-Spillable construction design.
- ABS containers and covers(UL94HB, UL94V-0) optional.
- Safety valve installation for explosion proof.
- High quality and high reliability.
- Exceptional deep discharge recovery performance.
- Low self discharge characteristic.
- Flexibility design for multiple install positions.



Terminal Dimensions

Construction

- Component .....Raw material
- Positive .....Lead dioxide
- Negative .....Lead
- Container .....ABS
- Cover .....ABS
- Sealant .....Epoxy Resin
- Safety valve .....EPDR
- Terminal .....Copper
- Separator .....AGM
- Electrolyte .....sulfuric acid thixotropic Gel



Battery Model	GT7.2-12 (MP7.2-12V)			
Designed Life	8 Years (Floating) or > 750 Cycles @ 50% D.O.D			
Capacity(25℃)		10HR(0.7A,1.75V)	5HR(1.23A,1.75V)	1HR(4.68A,1.75V)
	7. 2AH	7AH	6. 15AH	4.68AH
Dimensions	Length	Width	Height	Total Height
	151mm(5.94inch)	65mm(2.56inch)	93.4mm(3.68inch)	99mm(3.90inch)
Approx. Weight	2.4Kg (5.29 lbs)			
Internal Resistance	Full charged at 25℃: 0.02 Ohm			
Self Discharge	3% of capacity declined per month at (25℃)			
Capacity Affected by Temp.(20HR)	40℃	25℃	0℃	-15℃
	102%	100%	85%	65%
Charge Voltage(25℃)	Cycle use		Float use	
	14.4-15V(-30mV/ ℃), max. Current: 2.1A		13.6-13.8V(-20mV/ ℃)	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวผกามาส ทันดอน เกิดวันที่ 21 พฤษภาคม 2530 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553