ผลของสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะ
ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม

นางสาวฐิติพร ตันติชนะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ADDITIVES IN GEL ELECTROLYTE ON PERFORMANCE OF VALVE-REGULATED LEAD-ACID BATTERY

Miss Titiporn Tantichanakul

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 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แบบวาล์วควบคุม
โดย	นางสาวฐิติพร ตันติชนะกุล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. วีณา เสียงเพราะ)

ฐิติพร ตันตินะกุล : ผลของสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แบบวาล์วควบคุม (EFFECTS OF ADDITIVES IN GEL ELECTROLYTE ON PERFORMANCE OF VALVE-REGULATED LEAD- ACID BATTERY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ, 128 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แบบวาล์วควบคุม จากการศึกษาผลของสารเติมแต่งในอิเล็กโทรไลต์เหลว พบว่าโซเดียมซัลเฟต ช่วยเพิ่มสมรรถนะของแบตเตอรี่ โดยให้ค่าความจุมากขึ้นร้อยละ 6.85 และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.35 เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟต ดังนั้นในส่วนของเจลอิเล็กโทรไลต์จึงเตรียมจากฟูมซิลิกา กรดซัลฟิวริก สารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต และสารเติมแต่งต่างๆ ได้แก่ สารประกอบแอลดิไฮด์ วานิลลิน พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิแอคริลาไมด์ และพอลิพิร์โรล จากการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลและความแข็งของเจล พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกา สารประกอบแอลดิไฮด์ วานิลลินและพอลิแอคริลาไมด์ ส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลงและทำให้ความแข็งของเจลเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์เทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรี พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจน และการเพิ่มปริมาณสารประกอบแอลดิไฮด์และวานิลลินจะช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจนได้มากขึ้น ผลการทดสอบสมรรถนะในแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมป์แปร์-ชั่วโมง ภายใต้สภาวะการใช้งานจนคายประจุหมด (100% Depth of Discharge, DoD) พบว่าเมื่อไม่เติมสารเติมแต่งเจลแบตเตอรี่จะให้ค่าความจุโดยรวมสูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเหลว โดยเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5% w/v จะให้แนวโน้มค่าความจุมากที่สุด และเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งพบว่าเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4% w/v และ สารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v ให้แนวโน้มค่าความจุที่อัตราการคายประจุสูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5% w/v ร้อยละ 6.34 โดยให้ค่าความจุในการคายประจุที่อัตราต่ำใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ให้ค่าสมรรถนะสูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปในทางการค้าเมื่อทดสอบในแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมป์แปร์-ชั่วโมง และยังพบว่าเจลแบตเตอรี่มีอัตราการคายประจุด้วยตัวเอง (self discharge) ช้ากว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในภาวะเหลว โดยหลังเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือน เจลแบตเตอรี่มีความจุที่เหลืออยู่ร้อยละ 93 ซึ่งสูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวประมาณร้อยละ 6

ภาควิชา.......... เคมีเทคนิค................ลายมือชื่อ…………………………………………………..

สาขาวิชา..........เคมีเทคนิค………….ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์…………………………

ปีการศึกษา…….2552………………...

5172276223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORDS : GEL ELECTROLYTE / LEAD- ACID BATTERY / FUME SILICA

TITIPORN TANTICHANAKUL: EFFECTS OF ADDITIVES IN GEL ELECTROLYTE ON PERFORMANCE OF VALVE-REGULATED LEAD- ACID BATTERY. THESIS ADVISOR: NISIT TANTAVICHET, Ph.D., 128 pp.

This thesis studied the effects of additives in gel electrolyte on performance of valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries. Preliminary result shows that adding sodium sulfate in liquid electrolyte increases discharge capacity and efficiency about 6.85% and 2.35 %, respectively. So that in this study the gel electrolytes were prepared from fumed silica, sulfuric acid sodium sulfate and different additives (aldehyde, vanilline, polymethyl methacrylate, polyacrylamide and polypyrrole). The results show that higher silica content and the presence of aldehyde, vanilline or polyacrylamide shorten the gelling time and increase the gel strength. Based on CV results, gel electrolytes have lower hydrogen and oxygen evolution compared to the conventional liquid electrolyte. Addition of aldehyde or vanilline in gel electrolyte further reduces hydrogen and oxygen evolution. Different electrolyte formulations were filled into the 4 Ah VRLA batteries to test the battery performance under 100% depth of discharge conditions. The results show that without additive, the gel electrolyte prepared with 5%w/v fumed silica was found to yield the highest performance. The addition of 0.005 %w/v aldehyde in 4%w/v fumed silica increases discharge capacity on high rate discharge test by 6.34% compared to gel electrolyte prepared with 5%w/v fumed silica with no additive. It even gives higher performance than the commercial gel battery. The results of the self-discharge test show that prepared gel battery still has 93 % capacity after has been stored for 3 months, which is about 6% higher than the conventional liquid electrolyte battery.

Department : Chemical Technology Student's Signature ....

Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature ....

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบคุณอาจารย์ ดร.นิสิต ตัณฑวิเชฐ ภาควิชาเคมีเทคนิค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำด้านวิชาการและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ 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 พี่ต้อมและทรายที่ให้คำแนะนำ อำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.นพิดา หิญชีระนันท์ ที่ให้คำปรึกษาและอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณทวีศักดิ์ ช่างคณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือทำอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆและน้องๆในภาควิชาเคมีเทคนิคและภาควิชาเคมีที่ให้การสนับสนุนให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบคุณพระคุณบิดา มารดา พี่และน้อง ผู้อยู่เบื้องหลังที่เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นแรงผลักดันจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย…………………………………………………………………………	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..	จ
กิตติกรรมประกาศ..	ฉ
สารบัญ..	ช
สารบัญตาราง..	ญ
สารบัญภาพ..	ฐ
บทที่ 1 บทนำ…………………………………………………………………………	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา…..……………………………………..	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย…………………………...……………………………	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ…………………………..…………………………..	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย………………………………………………………	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง………………………..…………………………	5
2.1 แบตเตอรี่………….. ………..……………………………………………	5
2.2 สมรรถนะ คุณลักษณะและคำจำกัดความของแบตเตอรี่ ………..………………..	6
2.2.1 ค่าความต่างศักย์…………………………………………...………………..	6
2.2.2 กระแสไฟฟ้า ………………………………………………………………	7
2.2.3 การอัดและการคายประจุ…………………………………………………	7
2.2.4 ค่าความจุของแบตเตอรี่…………………………………………………...	9
2.2.5 อัตราการคายประจุ และอัตราการอัดประจุ……………………………....	10
2.2.6 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เก็บ พลังงานจำเพาะ และกำลังจำเพาะ	11
2.2.7 ประสิทธิภาพของพลังงาน………………………………………………...	12
2.2.8 การประจุไฟฟ้ามากเกินไป……………………………………………...	13
2.2.9 การคายประจุด้วยตัวเอง…………………………………………………	13
2.2.10 รอบอายุการใช้งาน…………………………………………………………	14
2.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ……………………………………………...…..	16
2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด………………………………..…….	16
2.3.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด……………………………...........	18

หน้า

2.4 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด………………………………………..…… 21
2.4.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบอิเล็กโทรไลต์เหลวหรือแบตเตอรี่แบบเปียก 21
2.4.2 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม……………………………… 21
2.5 เคมีของเจล ……………….……………..……………………………………... 23
2.5.1 ผลของค่า pH……………….…………..…………………………………….. 25
2.5.2 ผลของชนิดและความเข้มข้นของเกลือ..………………………………… 25
2.5.3 ผลของชนิด ปริมาณและขนาดอนุภาคของซิลิกา………………………... 25
2.6 หลักการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า…………………………………………..…... 27
2.6.1 หลักการของโวลแทมเมทรี... 28
2.6.2 เทคนิคสำคัญของการวิเคราะห์ในกลุ่มโวลแทมเมทรี ……………………. 28
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ……………………………………………………………… 31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย………………………………………………...…………... 35
3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย………..……………………… 35
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย...………………….………………………………… 35
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย…………………….……………………………….... 35
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย………………………………………………………. 36
3.2 วิธีการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์…………………………………………………… 37
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของอิเล็กโทรไลต์………………………………………… 38
3.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล………………………………... 38
3.3.2 การวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี……………... 39
3.4 การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่……………………..…..………………….. 45
3.4.1 การทดสอบหาค่าความจุการคายประจุของแบตเตอรี่……………………. 45
3.4.2 การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง ……………………….………………. 49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง…………….…….…………………. 51
4.1 การศึกษาผลของสารเติมแต่งเตรียมซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์เหลว……………… 51
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมทรี…………..……………….. 52
4.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่………..……………………….. 54
4.2 ผลการศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นโดยปราศจากสารเติมแต่งและผลของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์……………………………………… 56

4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์………….……………....... 56
4.2.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่…………….............................. 70
4.3 ผลการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง…….………………………………… 85
4.3.1 ผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต………………………………………... 86
4.3.2 ผลการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดเหลวและเจลแบตเตอรี่………………... 88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ…………………….……………………………… 91
5.1 สรุปผลการทดลอง………………………………………………………………… 91
5.2 ข้อเสนอแนะ……………………………………………………………………….. 93
รายการอ้างอิง………………………………………………………………………………… 94
ภาคผนวก……………………………………………………………………………………….. 97
ภาคผนวก ก การคำนวณ….…………..………………………………………….. 98
ภาคผนวก ข ตารางรวมผลการทดสอบแบตเตอรี่……………………………….... 101
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบและที่ใช้ทางการค้า…………... 122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์……………………………………………………………….. 128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อโครงสร้างเจล…………………………………	27
3.1	อิเล็กโทรไลต์เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ ที่นำมาทดสอบด้วยเทคนิคไซคริกโวลแทมเมทรี…………………………………………………………………	41
3.2	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง……………………………………….………..	47
3.3	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดของเหลวและเจล (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง ………….………....	48
3.4	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าและที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง………………………….………..……..………........................	49
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่…………..	50
3.6	ขั้นตอนการทดสอบหลังการเก็บรักษาเพื่อทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง…………………………………………….…………………………..	50
4.1	สรุประยะเวลา (ชั่วโมง:นาที)ในการเกิดเจลที่ปริมาณฟูมซิลิกาและสารเติมแต่งต่างๆ.....………………………………………………………………………	62
4.2	สรุปค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย…………….……...	84
4.3	เปรียบเทียบค่าความจุของแบตเตอรี่หลังจากเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือนขอเจลแบตเตอรี่ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับแบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าจากแหล่งต่าง ๆ…..	89
ก1	ค่าพารามิเตอร์ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริค แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น (kg/L) ความเข้มในหน่วย mol/L และ mol/kgH_2O ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ความต่างศักดิ์ไฟฟ้าที่ขั้วบวกและลบเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน….	99
ข1	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)…………………………..……………………………………......	102
ข2	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่างกัน ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)…………………………..…………………………	103

ตารางที่		หน้า
ข3	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 5 %w/v และสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)…..…	104
ข4	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 5 %w/v และสารเติมแต่งพอลิพิร์โรลปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)……………………	105
ข5	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิ-ไฮดปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)…..…..	106
ข6	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งวานิลลินปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)…………….……	107
ข7	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และ 0.005 %w/v ของสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับพอลิพิร์โรล ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)………………………………………………………………	108
ข8	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) ……………………………………………………...………..	109
ข9	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่างกัน ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) ………………………………………………….….....	111
ข10	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)………	113
ข11	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งวานิลลินปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)…………….........…	115

ตารางที่		หน้า
ข12	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง ระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปทางการค้ากับเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัย ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)…………….	117
ข13	เปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ที่ระยะเวลาในการเก็บต่างๆ ของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวและที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่าง ๆ………………………………………..………	119
ข14	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) หลังการเก็บ 3 เดือน…………………………………………………	120
ข15	เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) หลังการเก็บ 3 เดือน…………………	121

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด..	8
2.2	ลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 100 แอมป์แปร์-ชั่วโมง ในช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ.....................	8
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการคายประจุ จุดสิ้นของค่าความต่างศักย์ที่อัตราเร็วในการคายประจุต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดไม่ต้องการการบำรุงรักษา	10
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำเพาะพลังงานกับค่าจำเพาะกำลังของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆที่อัตราการคายประจุ a = 100 h, b = 10 h, c = 1 hและ d = 6 min...	12
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บที่อุณหภูมิต่างๆ ก) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุม ข) นิกเกิล-แคดเมียมเซลล์แบตเตอรี่..	14
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบอายุการใช้งานกับความลึกในการคายประจุของแบตเตอรี่ ก) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุม ข) นิกเกิล-แคดเมียมเซลล์แบตเตอรี่..	15
2.7	ส่วนประกอบต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด.............................	16
2.8	ปฏิกิริยาการคายและการอัดประจุภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (ก) ปฏิกิริยาการคายประจุไฟฟ้า (ข) ปฏิกิริยาการอัดประจุไฟฟ้า.............................	20
2.9	ผลการวิเคราะห์มวลองค์ประกอบเจลแบตเตอรี่เทียบกับแบตเตอรี่แบบเปียก	22
2.10	ขั้นตอนการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาค............................	24
2.11	ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างของเจลและการผลันกลับของโครงสร้างเจลด้วยพันธะไซโลเซน..	24
2.12	การรวมตัวกันของโครงสร้างเจล...	26
2.13	โพลาโรกราฟีแบบเส้นตรง ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์..................................	29
2.14	สัญญาณความต่างศักย์ที่ให้กับไซคลิกโวลแทมเมทรี............................	29

ภาพที่		หน้า
2.15	ไซคลิกโวลแทมโมแกรม…………………………………………………………	30
2.16	รูปที่ 2.16 สัญญาณแอมแปโรเมทรี ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์………………….	30
3.1	ภาชนะและเครื่องมือสำหรับเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ (ก) ภาชนะสำหรับเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ และ (ข) เครื่องมือสำหรับผสมเจลอิเล็กโทรไลต์และลักษณะอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ ……………………………………….….	37
3.2	ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจล………	39
3.3	แผนภาพการทดสอบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว ด้วยเทคนิคไซคริกโวลแทมเมทรี………………………………………………………………………..	40
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (ก) พื้นผิวขั้วไฟฟ้าทำงานเมื่อขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ (ข) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์..	43
3.5	เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTA30 ของบริษัท AUTOLAB..….	44
3.6	หน้าต่างโปรแกรม GPES ของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat.................	44
3.7	เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ UBA 4 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุต่ำ (อัตราการคายประจุ 10 ชั่วโมง)……………………………………………...	46
3.8	เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุสูง (อัตราการคายประจุ 1 ชั่วโมง)………………	48
4.1	ความต่างศักดิ์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบกรดซัลฟูริกที่ไม่เติมและเติมโซเดียมซัลเฟตช่วง ก) -2.5 V ถึง 3.0 V ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก…………………………………..	53
4.2	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต แบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร และแบตเตอรี่ที่ใช้ในการค้า ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง	55

ภาพที่		หน้า
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกาต่างๆ……………………………………………………………………..	57
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลที่ปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ………..	58
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ 0.5 %w/v …………………………	59
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ที่ปริมาณสารเติมแต่งต่างๆ ก) วานิลลิน ข) สารประกอบแอลดิไฮด์……………………………………………………………………..	60
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลของสารเติมแต่ง วานิลินและสารประกอบแอลดิไฮด์ที่ปริมาณต่าง ๆ………………………………………	61
4.8	เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3 %w/v สารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์ 0.03 %w/v ก) ด้านบน ข) ด้านข้าง……………………………………..	61
4.9	ความต่างศักดิ์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ก) เปรียบเทียบปริมาณฟูมซิลิกาต่างๆช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก…………………………………………………………………	64
4.10	ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก	66
4.11	ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณพอลิพิร์โรลต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก	67
4.12	ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เมื่อมีการเติมสารประกอบแอลดิไฮด์ปริมาณต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก…………………………………………………………………	68

ภาพที่ หน้า

4.13 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เมื่อมีการเติมวานิลินปริมาณต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก. 69

4.14 แสดงคุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็โทรไลต์เหลวกับเจลที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ ก) วางแนวตั้ง ข) วางแนวนอน... 70

4.15 ค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นที่อัตราเร็วในการคายประจุ 10 และ 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ปริมาณฟูซิลิกาต่าง ๆ... 71

4.16 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง... 73

4.17 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 5 %w/v 75

4.18 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอ-ลิพิริโรลต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 5 %w/v 76

4.19 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ ที่ปริมาณสารประกอบแอลดิไฮด์ต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)... 77

4.20 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณสวานิลลินต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)..................................... 79

ภาพที่		หน้า
4.21	ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เมื่อเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 0.005 %w/v โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 5 %w/v	80
4.22	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่เมื่อเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v กับเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5% w/vแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) การทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) การทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)	81
4.23	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ของเจลบตเตอรี่ที่พัฒนาและคิดค้นขึ้นกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) ก) ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่รอบการทดสอบต่างๆ ข) ระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่รอบการทดสอบต่างๆ....	83
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ...	85
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร..................	86
4.26	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองหลังจากเก็บแบตเตอรี่เป็นเวลา 3 เดือน ระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร ก) แสดงค่าความต่างศักย์และระยะเวลาในการคายประจุรอบแรก ข) แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน..	87
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ................................	88
4.28	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง (3 เดือน) ระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ.....................	90

ภาพที่		หน้า
ค1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะ เวลาในการเก็บของบริษัท Kung Long Batteries Industrial………………………..	122
ค2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะ เวลาในการเก็บของบริษัท MK battery………………………………………………	122
ค3	กความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท Narada Power Source………………………………	123
ค4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท MASTERVOLT……………………….………………	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญในการดำเนินชีวิต ปัจจุบันความต้องการบริโภคพลังงานเชื้อเพลิงมีมากขึ้น ตามประชากรที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี การได้มาซึ่งพลังงานมีหลากหลายวิธีหลากหลายชนิด แต่การเลือกใช้พลังงานแต่ละชนิดก็ส่งผลต่อมลพิษที่อาจก่อตัวขึ้นจากการใช้งานนั้นแตกต่างกันไป หนึ่งในพลังงานที่ถูกนำมาใช้งานมากและก่อมลพิษในขณะนี้ คือ พลังงานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม การเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดนี้ก่อให้เกิดแก๊สพิษต่างๆ ประกอบกับเชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถหมดได้ ดังนั้นพลังงานทางเลือกใหม่ ๆ จึงเกิดขึ้น หนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ คือ พลังงานที่ได้จากธรรมชาติ อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ พลังงานเหล่านั้นล้วนแต่แปลงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น พลังงานไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นพลังงานที่มีความต้องการและใช้งานง่ายที่สุด แต่อย่างไรก็ตามหากพลังงานไฟฟ้าถูกจำกัดการใช้งานด้วยปลั๊กเชื่อมต่อคงไม่สะดวกนัก ดังนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้กักเก็บพลังงานไฟฟ้าขึ้น หรือที่เรียกว่า แบตเตอรี่โดย Lurgi Galvani ในปี ค.ศ. 1789

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ทางเคมีไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้า (energy storage device) โดยแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) เพื่อใช้ในอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ รวมถึงการใช้ในการสตาร์ทและขับเคลื่อนยานพาหนะ แบตเตอรี่จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก โดยที่ข้อมูลในปี 2005 พบว่า มียอดขายแบตเตอรี่ทั่วโลกถึงประมาณ 48 ล้านล้านเหรียญสหรัฐ (ประมาณ 1 600 ล้านล้านบาท)

แบตเตอรี่สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (primary battery หรือ disposable battery) และแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary battery หรือ Rechargeable battery) โดยแบตเตอรี่ปฐมภูมิเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแบบผันกลับไม่ได้ หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพื่อแปลงพลังงานเคมีเป็นกระแสไฟฟ้า (Discharge) จะไม่สามารถนำมาประจุไฟฟ้าเพื่อนำกลับมาใช้ได้อีก เช่น อัลคาไลน์ (Alkaline battery) และ ลิเทียมแบตเตอรี่ (Lithium battery) ส่วนแบตเตอรี่ทุติยภูมิ เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแบบผันกลับได้ โดยสามารถประจุไฟฟ้า (Charge) เข้าไปให้แบตเตอรี่หลังการใช้งาน เพื่อให้แบตเตอรี่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery) แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบพอลิ

เมอร์ แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมแบตเตอรี่ (Nickel-cadmium battery) และแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery)

แบตเตอรี่ทุติยภูมิที่จัดได้ว่ามีอัตราการผลิต และความต้องการสูงสุดคือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ ทำให้มีอัตราส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ได้ต่อมวลของแบตเตอรี่ (energy per mass) ที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาถูกและคุ้มค่าต่อการใช้งานเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ [1] จึงเป็นที่นิยมใช้เมื่อขนาดของพื้นที่ในการติดตั้งแบตเตอรี่ไม่มีผลต่อการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ ตัวอย่างการนำไปใช้หลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ การนำไปสตาร์ท ขับเคลื่อนรถยนต์ และจักรยานยนต์ นอกจากนั้นยังนำไปใช้ในอุปกรณ์กักเก็บไฟฟ้าสำรองต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีปัญหาการรั่วซึมของกรดซัลฟิวริก ซึ่งใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้สมรรถภาพของการใช้งานของแบตเตอรี่ต่ำลง และทำให้อายุการใช้งานสั้น ต้องมีการเติมน้ำกลั่นตลอดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ นอกจากนั้นยังพบว่าอายุก่อนการใช้งาน (shelf life) เพียงประมาณ 6 เดือนซึ่งถือได้ว่าเป็นระยะเวลาที่สั้น

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้ที่มุ่งเน้นการศึกษา และปรับปรุง อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวให้อยู่ในสภาพเจล (gel electrolyte) ซึ่งเป็นสถานะที่ยากต่อการเคลื่อนไหว (immobilized electrolyte) ทำให้มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาพของเหลวหลายประการ เช่น มีการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์ที่ต่ำกว่า ลดปัญหาเกี่ยวกับการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ ตลอดจนพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น นอกจากการปรับปรุงให้อิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาพเจลแล้วยังทำการศึกษาถึงสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากสารเติมแต่งหลายชนิดส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ดังเห็นได้จากแบตเตอรี่ที่มี อิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวมีการเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ลงในขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ เช่น การเติมแคลเซียมลงในขั้วไฟฟ้าเพื่อลดการสูญเสียน้ำของแบตเตอรี่ [2] การเติมโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอัดประจุกลับ [3, 4, 5] การเติมสารเติมแต่งโพลีแอสพาเทตลงบนขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่มค่าความจุประจุและอายุการใช้งาน [6] และการเติมสารประกอบแอลดีไฮด์เพื่อช่วยในการลดการสูญเสียน้ำ [7] เป็นต้น ในต่างประเทศได้มีการพัฒนาเจลแบตเตอรี่จนประสบความสำเร็จ สามารถผลิตออกจำหน่ายได้แล้ว และได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจากมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ในส่วนของประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้ จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลทำให้เสียดุลการค้า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงควรค่าแก่การศึกษาและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่มี อิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาพเจล เพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศตลอดจนพัฒนาองค์ความรู้ของประเทศอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ชนิดเจลสำหรับใช้งานในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาวล์ควบคุม
2. ศึกษาผลของสารเติมเต่งในอิเล็กโทรไลต์ชนิดเจลสำหรับใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

   แบบวาล์วควบคุม
3. ทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาวล์ควบคุม โดยใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น และหาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ดีที่สุดเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการผลิตจริง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น
2. เป็นต้นแบบในการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดเพื่อใช้ในการผลิตจริงต่อไป

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับทฤษฎีเคมีไฟฟ้าโดยรวม ความรู้ทางด้านแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดทั้งที่มีอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาพของเหลวและเจล รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่
3. วางแผนการทดลองและเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทดลอง
4. คิดค้นสูตรและเทคนิคการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ใหม่
5. หาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เช่น
   - ปริมาณ gelling agent ที่เหมาะสม
   - ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่เหมาะสม
6. ทดสอบสมบัติพื้นฐานของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น เช่น
   - เวลาในการเกิดเจล (gelling time)
   - ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารวมตัวของออกซิเจน และปฏิกิริยาพื้นฐานในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมโมแกรม

7. ทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วที่บรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น เช่น
    - ความสามารถในการคายประจุที่อัตราเร็วต่างๆ
    - การคายประจุเอง (self discharge)
    - ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีเพื่อใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้า (energy storage device) โดยแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction) แบตเตอรี่จัดเป็นเซลล์กัลวานิก (galvanic cell) กล่าวคือ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เอง ไม่จำเป็นต้องใส่พลังงานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น ในทางตรงข้ามกลับได้พลังงานจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในรูปของพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปแบตเตอรี่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ไฟฟ้า การใช้ในการสตาร์ทและขับเคลื่อนยานพาหนะประเภทต่าง ๆ เช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์ รวมถึงใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ โน้ตบุ๊ค แบตเตอรี่จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในชีวิตประจำวันของเรา

การศึกษาแบตเตอรี่เริ่มตั้งแต่ปีค.ศ.1786 โดย Lurgi Galvani ซึ่งแรกเริ่มศึกษาในสัตว์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1791 *Alessandro Volta* ได้ศึกษาต่อ และสามารถวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force) ของแบตเตอรี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ในหน่วยโวลต์ และในปี ค.ศ. 1799 ได้นำแบตเตอรี่ที่คิดค้นมาต่อแบบอนุกรม (series) เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเรียกอุปกรณ์นี้ว่า *Voltaic Pile* ต่อมาได้มีการนำเซลล์เหล่านั้นหลาย ๆ เซลล์มาต่อรวมกันแบบขนาน (parallel) และถูกเรียกรวมว่า แบตเตอรี่ (battery) [8,9]

แต่อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ที่คิดค้นได้ในขณะนั้น มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากมี current drain ที่สูง หลังจากนั้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อให้นำมาใช้งานได้จริงของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่สามารถแบ่งได้ออกเป็น *2* ประเภท คือ

1. แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (primary battery) คือ แบตเตอรี่ที่เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปจนหมดแล้วหรือหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพื่อแปลงพลังงานเคมีเป็นกระแสไฟฟ้า (discharging) จนหมดแล้ว จะไม่สามารถนำมาประจุไฟฟ้าเพื่อนำกลับมาใช้ได้อีก เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้ ตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้แก่ อัลคาไลน์ (Alkaline battery) เซลล์เลอคลังเช (LeClanche Cell) และเซลล์ปรอท (Mercury Cell) เป็นต้น

2. แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (secondary battery) คือ แบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแบบผันกลับได้ โดยสามารถประจุไฟฟ้า (charging) เข้าไปให้แบตเตอรี่หลังการใช้งานเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถนำกลับมาใช้ได้ ตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้แก่ แบตเตอรี่

ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium battery) แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบพอลิเมอร์ แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมแบตเตอรี่ (Nickel-cadmium battery) และแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery)

อย่างไรก็ตามการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทุติยภูมิมีข้อจำกัด เนื่องจากในขบวนการประจุไฟฟ้ากลับให้แบตเตอรี่แต่ละครั้ง แบตเตอรี่จะมีการสูญเสียอิเล็กโทรไลต์ คุณสมบัติของอิเล็กโทรดแต่ละขั้วก็มีการเปลี่ยนแปลง รวมถึงการกัดกร่อนของอิเล็กโทรด ซึ่งทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถทำให้มีคุณสมบัติเหมือนเดิมเมื่อเทียบกับตอนก่อนนำมาใช้งาน จึงทำให้แบตเตอรี่ทุติยภูมิมีอายุการใช้งานที่จำกัด สามารถวัดได้เป็นจำนวนครั้งในการจ่ายและบรรจุประจุ *(charging / discharging)* ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะนำกลับมาใช้งานได้อีกก็ตาม [8, 9]

2.2 สมรรถนะ คุณลักษณะและคำจำกัดความของแบตเตอรี่

2.2.1 ค่าความต่างศักย์ (Voltage)

ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ขึ้นกับประเภทปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของแต่ละชนิดแบตเตอรี่ จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ระดับการคายและอัดประจุของเซลล์ อุณหภูมิและอื่นๆ ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่แสดงดังสมการที่ 2.1 [10, 11]

$$V = E^0 - |\eta_A| - |\eta_C| - IR_{cell} \qquad (2.1)$$

เมื่อ V = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

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

$|\eta_A|$ = ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของขั้วแค-โทดและแอโนด (โวลต์)

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

IR_{cell} = ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์ (โวลต์)

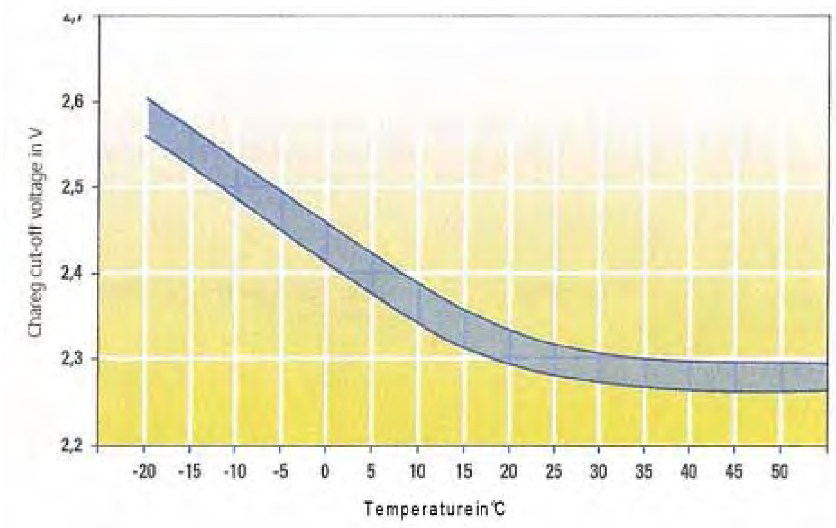
2.2.2 กระแสไฟฟ้า (Current)

กระแสไฟฟ้าเป็นตัววัดอัตราการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ค่ากระแส ไฟฟ้านั้นจะมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกับค่าความต่างศักย์ การดึงกระแสไฟฟ้าสูงหรือการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและการออกแบบของวัสดุว่องไว (active material) หากมีการจัดเรียงตัวที่แน่นและมีปริมาณวัสดุว่องไวมากจะส่งผลทำให้การเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดี โดยทั่วไปแล้ววัสดุว่องไวเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะพรุนเนื่องจากจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิด ปฏิกิริยา แต่จะมีการเปลี่ยนองค์ประกอบและโครงสร้างไประหว่างการคายประจุและอัดประจุแบตเตอรี่ เช่น ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ระหว่างการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แผ่นขั้วไฟฟ้าบวกจะเปลี่ยนจากตะกั่วไดออกไซด์ (PbO_2) ไปเป็นตะกั่วซัลเฟต($PbSO_4$) เป็นต้น [10,12]

2.2.3 การอัดและการคายประจุ (Charging and discharging)

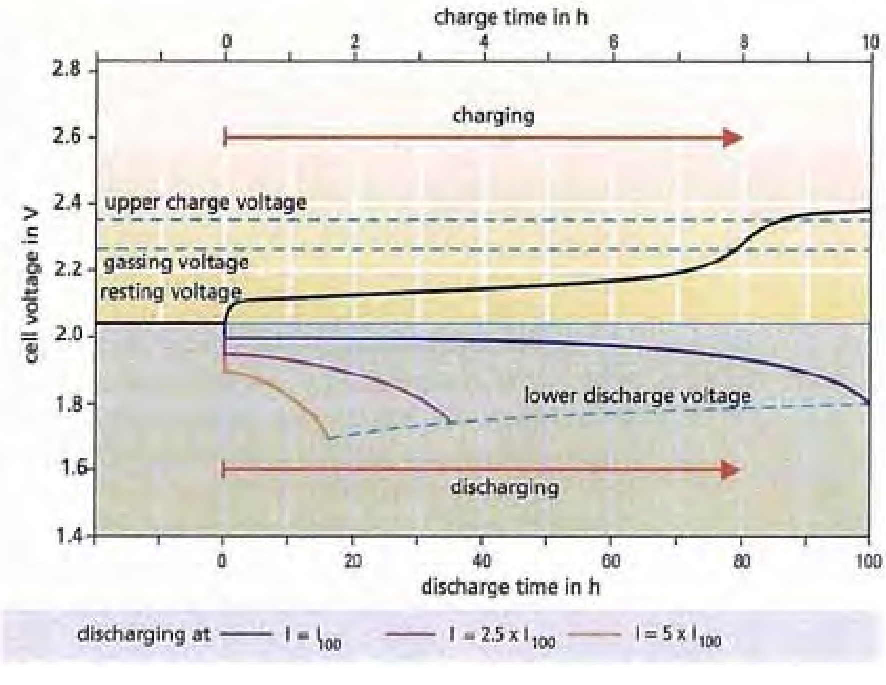
ระหว่างกระบวนการอัดประจุ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดนั้นหากปล่อยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่ น้ำจะถูกแยกตัวออกเป็นออกซิเจนและไฮโดรเจน เรียก oxy-hydrogen gas ซึ่งสามารถจุดติดไฟและระเบิดได้ง่าย ดังนั้นจึงควรจำกัดความต่างศักย์ไฟฟ้าตอนอัดประจุไม่ให้เกินค่าความต่างศักย์ปลดออก (charge cut-off voltage) เมื่ออัดประจุ ค่าความต่างศักย์ปลดออกของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแสดงดังรูปที่ 2.1

ระหว่างกระบวนการคายประจุ เมื่อเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างทันทีเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้า ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร จากนั้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้สิ้นสุดกระบวนการ หรือจนถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าปลดออกเมื่อคายประจุ (discharge cut-out voltage) หากปล่อยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงต่อไปจนกระทั่งต่ำกว่าค่านี้ จะทำให้ความเข้มข้นของกรดจะมีค่าสูงมาก ส่งผลทำให้เกิดเป็นผลึกซัลเฟตบนขั้วไฟฟ้า และเกิดการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าขึ้น



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด[13]

ในรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดในช่วงกระบวนการอัดและการคายประจุ charge cut-off voltage (หรือ upper charge voltage), discharge cut-out voltage (หรือ lower discharge voltage) และ gassing voltage



รูปที่ 2.2 ลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 100 แอมป์แปร์-ชั่วโมง ในช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ [13]

2.2.4 **ค่าความจุของแบตเตอรี่** (Capacity of battery)

ความจุของแบตเตอรี่คือ ประจุไฟฟ้าที่คาดว่าจะได้รับจากแบตเตอรี่ โดยทั่วไปแล้วอยู่ในหน่วยของแอมแปร์-ชั่วโมง ค่าความจุของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่ การคำนวณความน่าจะเป็นของค่าความจุของขั้วไฟฟ้านั้น (Nominal Capacity, C) สามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) แสดงดังสมการที่ 2.2 [10]

$$C = WnF/M \tag{2.2}$$

เมื่อ	C	=	ค่าความจุของแบตเตอรี่ (คูลอมบ์หรือแอมแปร์-ชั่วโมง)
	W	=	น้ำหนักวัสดุว่องไว (กรัม)
	n	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่ให้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (equiv./mol)
	F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,480 คูลอมบ์/equiv.)
	M	=	มวลโมเลกุลของวัสดุว่องไว (กรัม/โมล)

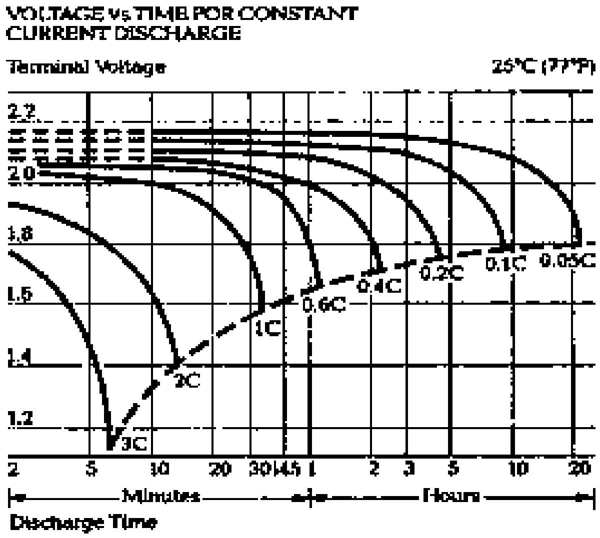
นอกจากนี้การหาค่าความจุของแบตเตอรี่ที่ได้จริงนั้นสามารถหาได้จากการทดสอบ โดยกำหนดค่ากระแสที่จ่ายหรือดึงออกระหว่างการคายประจุ หาระยะเวลาที่ทำให้ค่าความต่างศักย์ลดลงจนถึงค่าที่กำหนดหรือจุดตัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (charge cut-off voltage) โดยค่าความจุของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากสมการ 2.3 และ 2.4 [8, 9, 11, 12, 13]

$$C = \int_0^t I(t)dt \tag{2.3}$$

$$C = I\Delta t \tag{2.4}$$

เมื่อ	I	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	Δt	=	ระยะเวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)

สำหรับการหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่นั้น ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการกำหนดจุดตัดมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการคายประจุที่ใช้ทดสอบแบตเตอรี่ ตัวอย่างจุดตัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อัตราเร็วในการคายประจุต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการคายประจุ จุดสิ้นของค่าความต่างศักย์ที่อัตราเร็วในการคายประจุต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดไม่ต้องการการบำรุงรักษา [12]

2.2.5 อัตราการคายประจุ และอัตราการอัดประจุ

อัตราการคายประจุและการอัดประจุจะใช้การเปรียบเทียบค่ากระแสที่ถูกใช้ในการประจุแบตเตอรี่และขึ้นกับค่าความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะแสดงเป็นจำนวนชั่วโมง เช่น อัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) และอัตรา 240 ชั่วโมง (240 hour rate) เป็นต้น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบที่อัตราการคายและอัตราการอัดประจุต่างๆสามารถคำนวณจากค่าความจุที่แบตเตอรี่สามารถคายประจุได้ หารด้วยจำนวนชั่วโมงดังแสดงในสมการที่ 2.5 [12, 13]

$$\text{Rate (charge/discharge)} = \frac{C}{t} \tag{2.5}$$

เมื่อ Rate (charge/discharge) = กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดหรือคายประจุแบตเตอรี่ (แอมแปร์)

C = ค่าความจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)

t = อัตราการคายหรือการอัดประจุที่ใช้ (ชั่วโมง)

ตัวอย่างเช่น C/10 (0.1C) หรืออัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) หมายถึง ค่ากระแสเทียบเท่า Rated Capacityในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง หารด้วย 10

2.2.6 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เก็บ พลังงานจำเพาะ และกำลังจำเพาะ (Electricity storage density, Specific energy and Specific Power)

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เก็บ (Electricity storage density) พลังงานจำเพาะ (Specific energy) และกำลังจำเพาะ (Specific Power) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้ดังนี้ [10, 11, 12]

$$\text{Electricity storage density} = \frac{C}{W} \tag{2.6}$$

$$\text{Specific energy} = \frac{It'V_{ave}}{W} \tag{2.7}$$

$$\text{Specific power} = \frac{IV_{ave}}{W} \tag{2.8}$$

เมื่อ Electricity storage density = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เก็บ (แอมแปร์-ชั่วโมง/กิโลกรัมของแบตเตอรี่)

Specific energy = พลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัมของแบตเตอรี่)

Specific power = กำลังจำเพาะ (กิโลวัตต์/กิโลกรัมของแบตเตอรี่)

C = ค่าความจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)

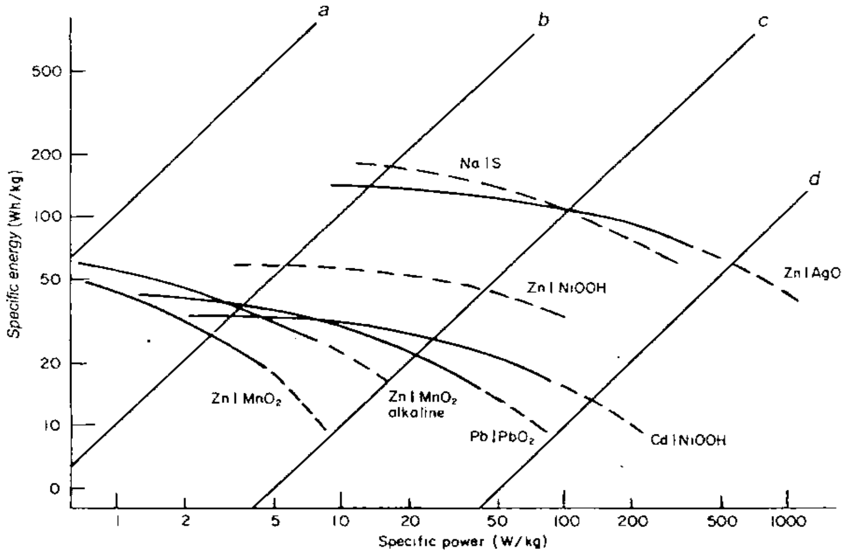
W = น้ำหนักของแบตเตอรี่ (กิโลกรัม)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t' = เวลา (ชั่วโมง)

V_{ave} = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)

สำหรับค่าความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจำเพาะกับกำลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำเพาะพลังงานกับค่าจำเพาะกำลังของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ที่อัตราการคายประจุ a = 100 h, b = 10 h, c = 1 hและ d = 6 min [11]

2.2.7 **ประสิทธิภาพของพลังงาน** (Power efficiency)

ประสิทธิภาพของพลังงานไฟฟ้า(Power efficiency) สามารถวัดได้ในหน่วยของวัตต์-ชั่วโมงหรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง การคำนวณหาประสิทธิภาพของพลังงานได้จากสมการที่ 2.9 [10, 12, 13]

$$\text{Power efficiency (\%)} = \frac{\text{Power of discharge}}{\text{Power of charge}} \times 100 \qquad (2.9)$$

ค่าความจุของแบตเตอรี่นอกจากจะสามารถวัดได้ในหน่วยของแอมแปร์-ชั่วโมงแล้วยังสามารถวัดในรูปของประสิทธิภาพของการอัดประจุ (charge efficiency) หรืออาจเรียกว่าประสิทธิภาพของแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah efficiency) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 [12, 13]

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

2.2.8 **การประจุไฟฟ้ามากเกินไป** (Behaviour on overcharge)

การอัดประจุไฟฟ้าที่มากเกินไปนั้นเกิดขึ้นเฉพาะในแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ โดยจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดประจุ ซึ่งมีการให้ประจุเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ โดยกระบวนการนี้จะส่งให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ขั้วไฟฟ้า เช่น การเกิดปฏิกิริยาการแยกน้ำดังแสดงในสมการที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นส่งผลเสียต่อการทำงานของแบตเตอรี่รวมถึงอาจเกิดการระเบิดขึ้นได้ [12, 13]

ขั้วบวกจะเกิดปฏิกิริยาผลิตก๊าซออกซิเจน (oxygen evolution) ดังสมการ

$$H_2O \longleftrightarrow 2H^+ + 1/2O_2(g) + 2e^- \qquad (2.11)$$

และที่ขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen evolution) เกิดขึ้น

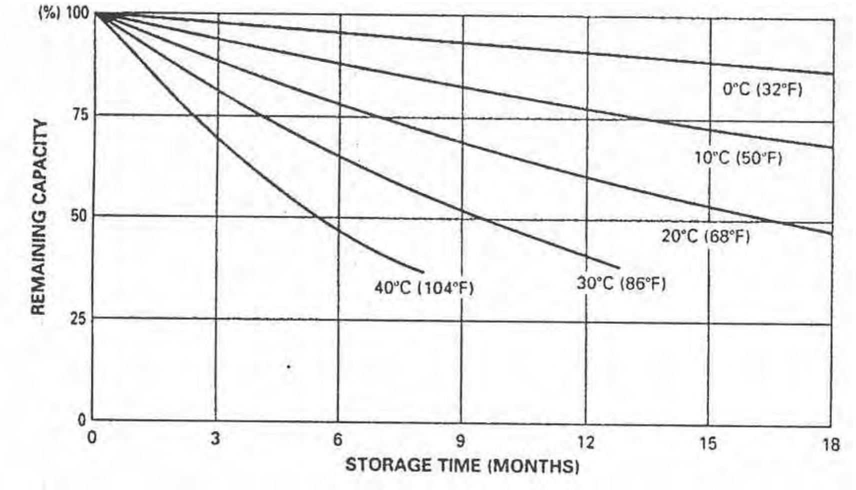
$$2H^+ + 2e^- \longleftrightarrow H_2(g) \qquad (2.12)$$

ปฏิกิริยารวม คือ $H_2O \longleftrightarrow H_2(g) + 1/2O_2(g)$ (2.13)

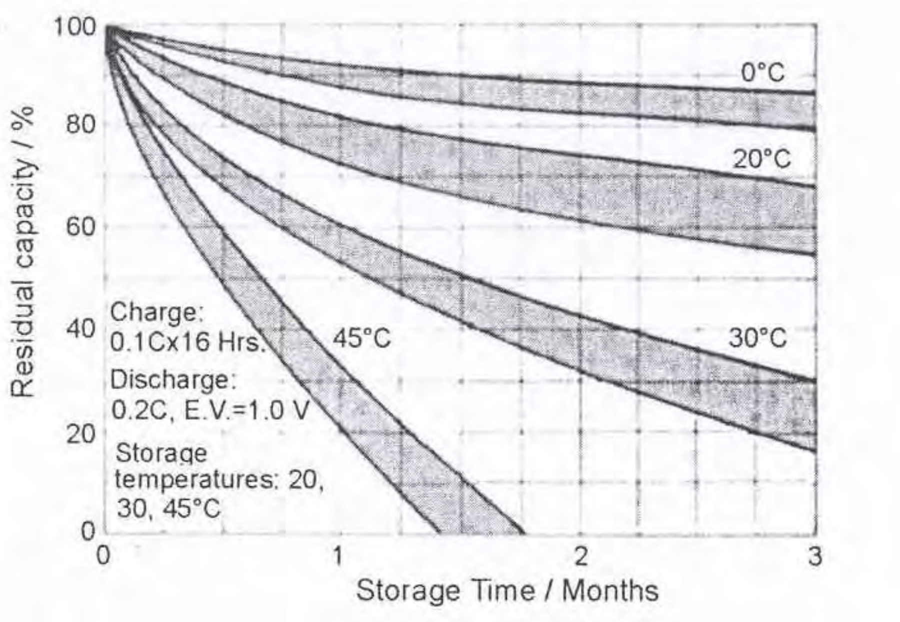
2.2.9 **การคายประจุด้วยตัวเอง** (Self discharge)

การคายประจุด้วยตัวเองเป็นการสูญเสียประจุของแบตเตอรี่ ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ไม่ได้ถูกใช้งาน หากปล่อยแบตเตอรี่ทิ้งไว้ที่วงจรเปิดหรือไม่มีกระแสในระยะเวลาหนึ่งแบตเตอรี่จะเกิดการคายประจุด้วยตัวเอง เช่น แบตเตอรี่ปฐมภูมิที่ถูกวางบนชั้นจำหน่ายในร้านค้า เมื่อผ่านไปหลายๆ ปีจะพบว่าค่าความจุจะเหลืออยู่ไม่เท่ากับความจุตั้งต้น แต่สำหรับแบตเตอรี่ทุติยภูมินั้น อัตราการคายประจุด้วยตัวเองจะอ้างถึงด้วยเปอร์เซ็นต์ความจุที่หายไปต่อเดือนโดยตั้งต้นที่ค่าความจุเต็มพิกัด นอกจากนั้นอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้อัตราเร็วการคายประจุด้วยตัวเองเปลี่ยนไป โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 องศาเซลเซียส แบตเตอรี่หลายชนิดจะเกิดการคายประจุด้วยตัวเองเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.5 [12, 13]

ก)



ข)



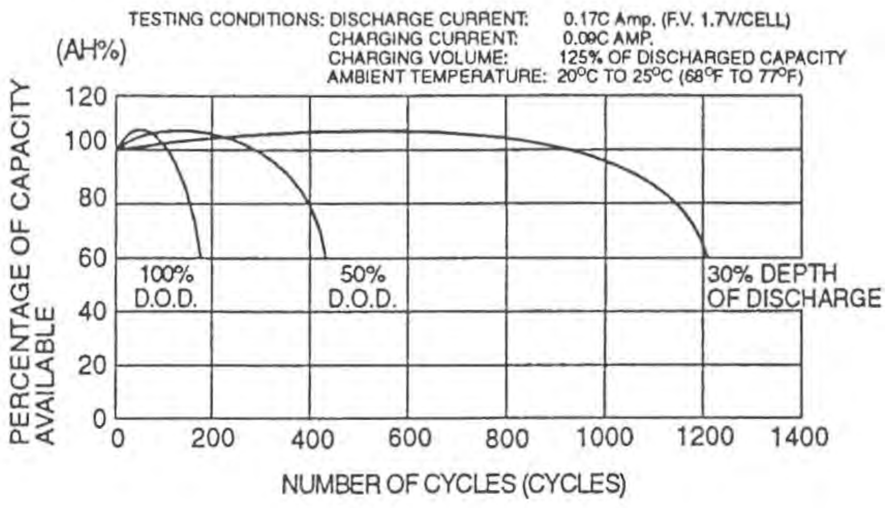
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บที่อุณหภูมิต่างๆ ก) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุม ข) นิกเกิล-แคดเมียมเซลล์แบตเตอรี่ [12]

2.2.10 รอบอายุการใช้งาน (Cycle life)

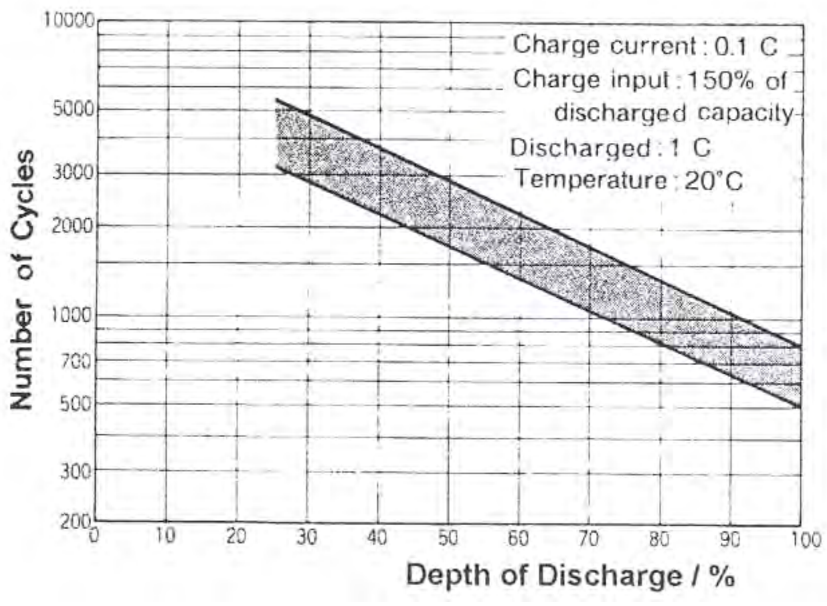
ความหมายของคำว่า ไซเคิล (Cycle) คือ จำนวนรอบของการคายและอัดประจุที่ทำซ้ำๆ กัน ซึ่งเป็นการทำงานปกติของแบตเตอรี่ ดังนั้นหนึ่งไซเคิล หรือ หนึ่งรอบเท่ากับการคายประจุหนึ่งครั้งตามด้วยการอัดประจุหนึ่งครั้ง โดยวงจรอายุของแบตเตอรี่เป็นการวัดจำนวนไซเคิลของ

แบตเตอรี่ซึ่งแบตเตอรี่สามารถใช้งานอย่างปกติได้ตลอดชั่วอายุ โดยทั่วไปจะพิจารณาจากจำนวนรอบของการคายประจุและความลึกในการคายประจุ (Deep of discharge, %DOD) จำนวนรอบอายุการใช้งานจะขึ้นกับค่าความลึกของการคายประจุในแต่ละรอบ โดยจำนวนรอบการใช้งานจะแตกต่างไปในแบตเตอรี่แต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [10, 12, 13]

ก)



ข)



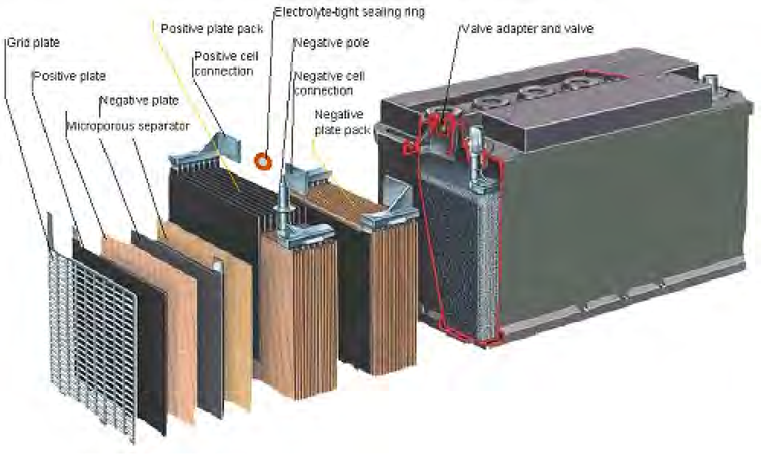
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบอายุการใช้งานกับความลึกในการคายประจุของแบตเตอรี่ ก) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุม ข) นิกเกิล-แคดเมียมเซลล์แบตเตอรี่ [12]

2.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery)

แบตเตอรี่ทุติยภูมิแต่ละชนิดเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานและข้อจำกัดอื่นๆ เช่น ขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่ ตลอดจนรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละชนิดที่สอดคล้องกับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ แบตเตอรี่ทุติยภูมิที่จัดได้ว่ามีอัตราการผลิต และความต้องการสูงสุดคือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้มีอัตราส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ได้ต่อมวลของแบตเตอรี่ (energy per mass) ที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาถูกเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ [1] จึงเป็นที่นิยมในการใช้งาน เมื่อขนาดของพื้นที่ในการติดตั้งแบตเตอรี่ไม่มีผลต่อการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ โดยการนำไปใช้งานหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ การนำไปสตาร์ท และ/หรือขับเคลื่อนรถยนต์ และจักรยานยนต์ หรือนอกจากนั้นยังนำไปใช้ในอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าสำรองซึ่งนับวันจะเพิ่มความสำคัญมากยิ่งขึ้น โดยองค์ประกอบและหลักการทำงานโดยทั่วไปของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แสดงดังนี้

2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

โดยทั่วไปแล้วแบตเตอรี่ตะกั่ว – กรด ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 2.7 คือ



รูปที่ *2.7* ส่วนประกอบต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด [14]

1. ตะแกรงขั้วบวก (Positive grid) สำหรับแบตเตอรี่ที่มีจำนวนรอบการใช้งานสูง จะทำจากอัลลอยด์ของตะกั่ว-พลวง (Pb-Sb) ในขณะที่แบตเตอรี่ที่มีจำนวนรอบการใช้งานต่ำ จะทำจากตะกั่วบริสุทธิ์(Pb) หรือ ตะกั่ว-แคลเซียม (Pb-Ca) หรือ ตะกั่ว-

แคลเซียม-ดีบุก (Pb-Ca-Sn) โครงสร้างนี้มีผลต่อการกัดกร่อนและความเครียดในแต่ละรอบการประจุไฟฟ้า

2. วัสดุขั้วบวก (Positive active-material, PAM) ทำจากตะกั่วออกไซด์ที่มีรูพรุนและพื้นผิวสูง
3. ตะแกรงขั้วลบ (Negative grid) ทำจากอัลลอยด์ของตะกั่ว-พลวง(Pb-Sb) หรือตะกั่ว-แคลเซียม (Pb-Ca) ปกติวัสดุพวกนี้ไม่มีผลต่อจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่
4. วัสดุขั้วลบ (Negative active-material, NAM) มีองค์ประกอบของตะกั่วและสารเติมแต่งที่มีรูพรุนและพื้นผิวสูง สารเติมแต่งมีส่วนช่วยในการรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แต่ถ้านำไปใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส สารเติมแต่งก็จะถูกทำลาย ส่งผลให้เสียความจุของแบตเตอรี่
5. แผ่นกั้น (Separates) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แผ่นธาตุบวก และแผ่นธาตุลบแตะกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น แผ่นกั้นนี้ทำจากไฟเบอร์กลาสหรือยางแข็ง เจาะรูพรุนเพื่อให้น้ำกรดสามารถไหลถ่ายเทไปมาได้ มีขนาดความกว้างยาวเท่ากับแผ่นขั้วบวกและแผ่นขั้วลบ
6. อิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte) ในแบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็ก-โทรไลต์ ในแบตเตอรี่รถยนต์จะใช้กรดซัลฟิวริก(H_2SO_4) ความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 - 1.34 อิเล็กโทรไลต์ยังเป็นแหล่งของซัลเฟตไอออนสำหรับการเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่
7. เซลล์ (Cell) คือช่องที่บรรจุแผ่นขั้วบวก แผ่นขั้วลบ ที่วางสลับกัน กั้นด้วยแผ่นกั้นแล้วจุ่มในน้ำกรด ในช่องหนึ่งจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2.1 โวลต์ โดยในแต่ละเซลล์จะมี ส่วนบนเป็นที่เติมน้ำกรดและมีฝาปิดป้องกันน้ำกรดกระเด็นออกมา และที่ฝาปิดก็จะมีรูระบายก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีให้ระบายออกไปได้
8. ฝาปิดเซลล์ (Battery Cell Plug) หรือฝาปิดช่องเติมน้ำกรด ฝานี้จะมีรูระบายก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีภายในแบตเตอรี่ให้สามารถระบายออกไปได้ ถ้าไม่มีฝาระบายนี้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีก๊าซไฮโดรเจนจะไม่สามารถระบายออกไปได้ ทำให้เกิดแรงดันสูงจนแบตเตอรี่สามารถเกิดระเบิดขึ้นได้ [12, 13, 14, 15]

2.3.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ คือ อิเล็กโทรด 2 ขั้ว โดยมีขั้วหนึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวก อีกขั้วหนึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ โดยอิเล็กโทรดทั้งสอง ประกอบด้วยธาตุชนิดเดียวกัน คือ ตะกั่ว โดยที่ขั้วแคโทดหรือขั้วบวก อิเล็กโทรดจะอยู่ในรูปตะกั่วออกไซด์ ส่วนขั้วแอโนดหรือขั้วลบ อิเล็กโทรดจะอยู่ในรูปธาตุตะกั่ว โดยขั้วทั้งสองถูกแยกกันโดยอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำหน้าที่นำไอออน (ionic conductor) ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งแต่ละขั้วจะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างการจ่ายไฟฟ้า (discharging) และการประจุไฟฟ้า (charging)

ระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้า ขั้วแคโทดหรือขั้วบวก อิเล็กโทรดที่อยู่ในรูปตะกั่ว (IV) ออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน กับกรดซัลฟิวริก โดยมีตะกั่ว (II) ซัลเฟต และน้ำ เป็นผลผลิตดังสมการ

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

ส่วนที่ขั้วแอโนดหรือขั้วลบ อิเล็กโทรดจะอยู่ในรูปตะกั่ว ระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้า ตะกั่วจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับซัลเฟตไอออน โดยมีตะกั่ว(II) ซัลเฟต เป็นผลผลิต ดังสมการ

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

โดยปฏิกิริยารวม คือ

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

ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “the double sulfate reaction”

อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดหรือขั้วลบผ่านวงจรภายนอก ไปยังขั้วแคโทดหรือขั้วบวก จากสมการจะสังเกตได้ว่ามีผลิตภัณฑ์คือ ตะกั่ว (II) ซัลเฟตทั้งสองขั้ว ดังนั้นเมื่อใช้แบตเตอรี่ไประยะหนึ่งความต่างศักย์จะระหว่างขั้วลบและขั้วบวกลดลง และจะลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากขั้วไฟฟ้าทั้งคู่เหมือนกันจึงไม่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง

ปฏิกิริยาของเซลล์ข้างต้นเป็นแบบผันกลับได้ ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดการผันกลับจึงจำเป็นต้องมีการอัดไฟฟ้าใหม่ โดยการต่อขั้วบวกของเซลล์กับขั้วบวกของแบตเตอรี่และขั้วลบกับขั้วลบของแบตเตอรี่ เพื่อให้ปฏิกิริยาข้างบนเปลี่ยนทิศทางเป็นจากขวาไปซ้าย ในลักษณะนี้ตะกั่ว

(II) ซัลเฟตที่ขั้วลบ ก็จะเปลี่ยนเป็นตะกั่ว ส่วนอีกขั้วหนึ่ง ตะกั่ว (II) ซัลเฟตจะเปลี่ยนเป็นตะกั่ว (IV) ออกไซด์ ดังสมการ

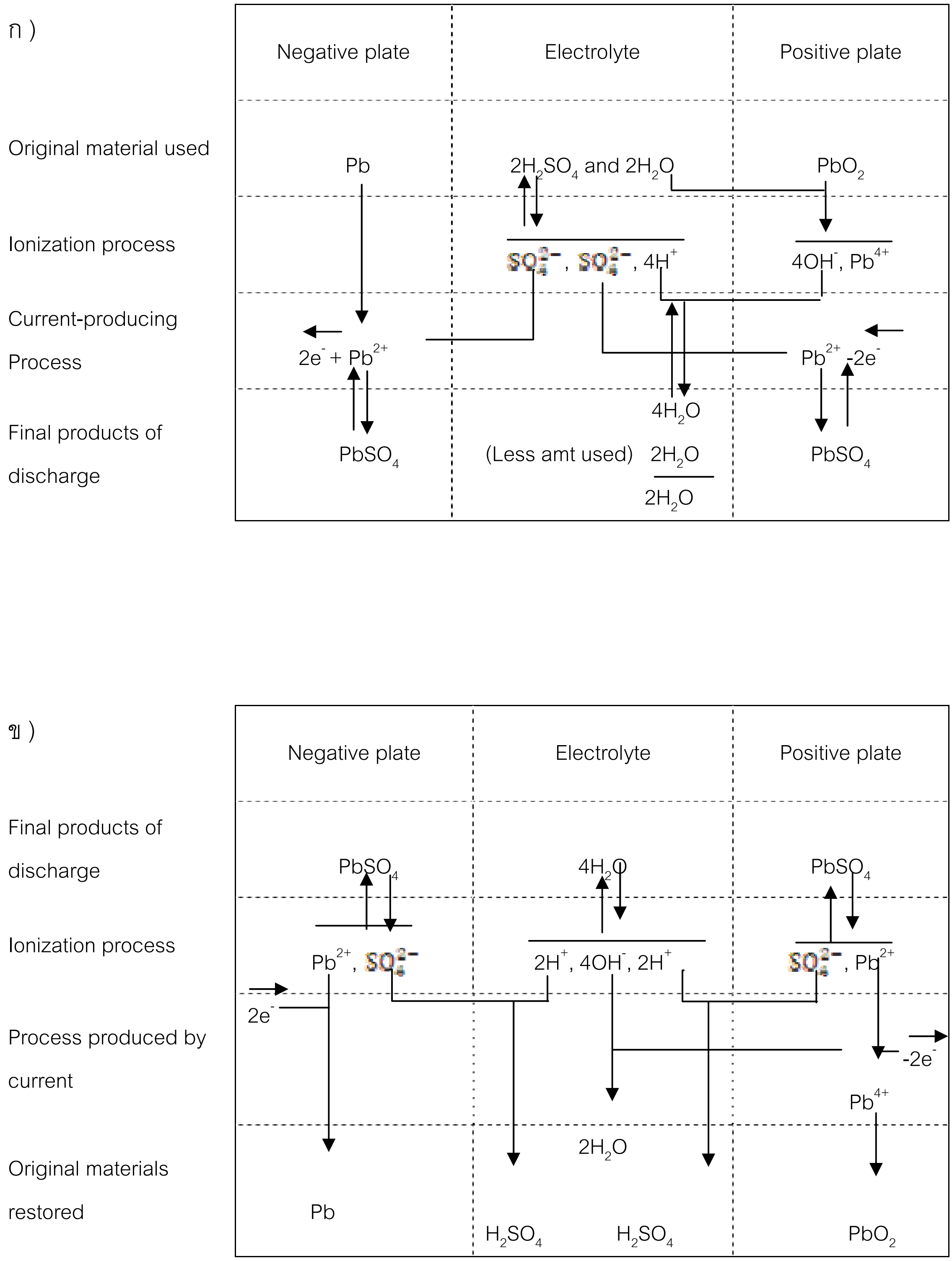
แอโนด-ขั้วบวก: $PbSO_4(s) + 2H_2O(l) \longrightarrow PbO_2(s) + SO_4^{2-}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^-$ (2.14')

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

จากปฏิกิริยาในขณะที่มีการจ่ายไฟฟ้า ความเข้มข้นของกรดจะลดลงเรื่อย ๆ จากเดิมที่มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 ถึง 1.34 ขึ้นกับความเข้มข้นกรดที่ใช้และอุณหภูมิในขณะนั้น ๆ ถ้าหากเมื่อใดมีความถ่วงจำเพาะลดลงจนต่ำกว่า 1.20 ที่อุณหภูมิห้องก็ควรจะมีการประจุไฟฟ้าใหม่ [12]

ดังนั้นระหว่างขบวนการจ่ายและการประจุไฟฟ้าจะมีกลไลการละลาย และการพอกพูนของธาตุตะกั่วและตะกั่วออกไซด์ในรูปตลอดเวลา และจากปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะเห็นได้ว่า กรดซัลฟิวริกมีความจำเป็นเนื่องจากเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี นอกจากนั้นกรดซัลฟิวริกยังทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ระหว่างกระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.8

นอกจากปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ที่เกิดจากกระบวนการอัดและคายประจุแล้ว หากแบตเตอรี่เกิดการอัดประจุเกินขนาด (overcharge) หลังจากการประจุไฟฟ้าสมบูรณ์แล้ว ประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงดังที่ได้กล่าวในข้อ 2.2.8 ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน ออกจากแบตเตอรี่ระหว่างขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และทำให้ปริมาณน้ำในแบตเตอรี่ลดลง ส่งผลให้กรดซัลฟิวริกมีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลเสียต่อสมรรถภาพการทำงานของแบตเตอรี่ อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง ตลอดจนความสามารถในการเก็บประจุต่ำลง



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการคายและการอัดประจุภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ก) ปฏิกิริยาการคายประจุไฟฟ้า ข) ปฏิกิริยาการอัดประจุไฟฟ้า [8, 16].

2.4 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด

โดยทั่วไปสามารถแบ่งแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรดออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.4.1. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบอิเล็กโทรไลต์เหลวหรือแบตเตอรี่แบบเปียก (Flooded battery or Wet cell battery)

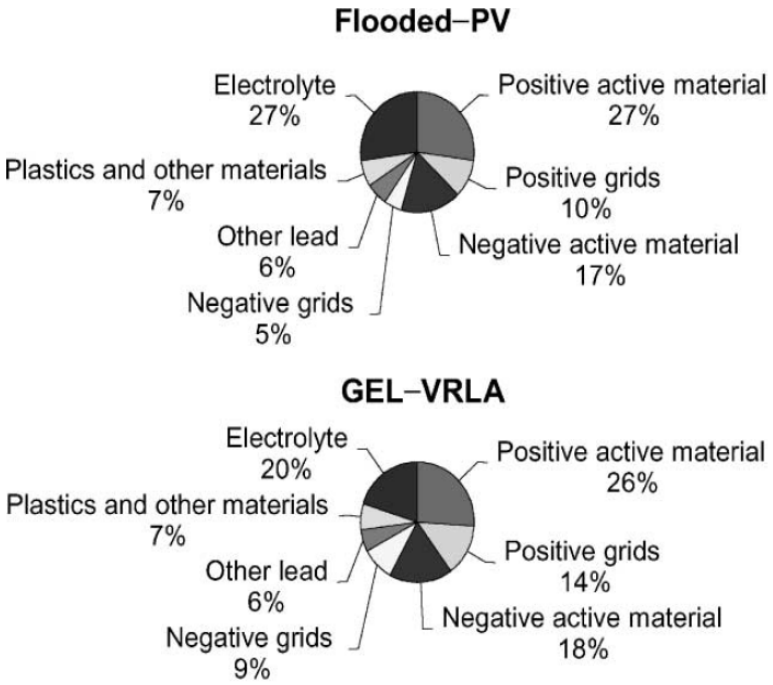
โดยปกติแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ได้ถูกออกแบบในลักษณะที่มีกรดซัลฟิวริกอยู่ในสถานะของเหลว ซึ่งเรียกว่า “flood-electrolyte lead acid battery” [19] แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดนี้จะมีการสูญเสียน้ำระหว่างกระบวนการประจุไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้มาสักระยะหนึ่ง จะมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาประจุไฟฟ้า (recharge reaction) ลดลง (เริ่มจากประสิทธิภาพน้อยกว่าประมาณ 85%) และเนื่องจากการประจุไฟฟ้าเกิน (overcharge) หลังจากประจุไฟฟ้าสมบูรณ์แล้ว ประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงดังที่ได้กล่าวในข้อ 2.2.8

ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว–กรดประเภทนี้ต้องการกรดซัลฟิวริกในปริมาณที่มากและจะต้องมีช่องสำหรับเติมน้ำกลั่น เพื่อรักษาระดับของสารละลาย ความเข้มข้นของกรดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม อิเล็กโทรไลต์เหลวให้อยู่เหนือขั้วอิเล็กโทรดตลอดเวลา และต้องมีการประจุไฟฟ้าคืนให้แบตเตอรี่ภายในเวลาอันรวดเร็ว เพื่อป้องกันการเสื่อมสมรรถภาพของแบตเตอรี่ จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องการการบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งาน [20]

2.4.2. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม (Valve-regulated lead-acid battery)

จากปัญหาที่การสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่ในระหว่างการใช้งาน รวมทั้งการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์ที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดรูปแบบใหม่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาพยากต่อการเคลื่อนไหว (immobilized electrolyte) ซึ่งเรียกว่า แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม (valve-regulated lead-acid battery, VRLA) โดยทั่วแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีจำนวนรอบการใช้งานที่มากกว่า อายุการใช้งานยาวนาน มีความต้านทานต่อการประจุไฟฟ้าเกิน สามารถใช้งานได้หลายสถานที่และหลายช่วงอุณหภูมิ [19] แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทตามเทคโนโลยีที่ใช้ในแบตเตอรี่ คือ เทคโนโลยีแผ่นดูดซึมใยแก้ว (Absorptive glass-mat, AGM) และเจลอิเล็กโทรไลต์ (Gel electrolyte, GEL) [13, 19]

ผลการวิเคราะห์มวลองค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดเจลขนาด 12 โวลต์ 84 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่ใช้งานสำหรับเซลล์สุริยะ เทียบกับแบตเตอรี่แบบเปียกขนาด 12 โวลต์ 84 แอมแปร์-ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์มวลองค์ประกอบเจลแบตเตอรี่เทียบกับแบตเตอรี่แบบเปียก [20]

เนื่องจากในการออกแบบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมนั้น ไม่สามารถเปิดออกเพื่อเติมน้ำได้ และมีความต้องการอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่น้อยกว่าแบบเดิมมาก ส่งผลให้มีการกัดกร่อนของอิเล็กโทรดที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ก๊าซออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างการประจุแบตเตอรี่ที่ขั้วบวกสามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่สภาพเจลไปยังขั้วลบที่เกิดขึ้นได้ดีเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาวะของเหลว และออกซิเจนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีผลิตภัณฑ์เป็นน้ำผ่านขบวนการ oxygen-recombination cycle [17, 20] ที่ขั้วลบแทนที่จะโดนปล่อยออกจากแบตเตอรี่ ทำให้มีการสูญเสียน้ำ (water loss) ในปริมาณที่น้อย สำหรับขบวนการ oxygen-recombination cycle ประกอบด้วยปฏิกิริยาดังสมการ

ที่ขั้วบวก : $H_2O \longleftrightarrow 2H^+ + 1/2O_2(g) + 2e^-$ (2.17)

ที่ขั้วลบ : $Pb + 1/2O_2(g) + H_2SO_4 \longleftrightarrow PbSO_4 + H_2O$ (2.18)

$PbSO_4 + 2H^+ + 2e^- \longleftrightarrow Pb + HSO_4^-$ (2.19)

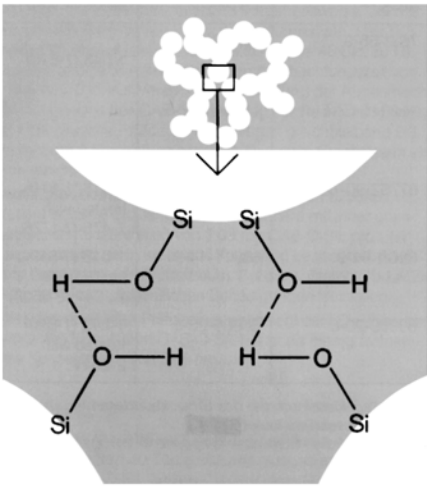
โดยที่ขบวนการนี้ก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ขั้วบวกจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วลบและเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วลบ(ปฏิกิริยาตามสมการ (2.18)) และป้องกันการไม่ให้อิเล็กโทรดมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงจนทำให้เกิดปฏิกิริยาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน แต่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2.19) เกิดขึ้นแทน ซึ่งเป็นผลดีโดยไม่ต้องเติมน้ำให้กับแบตเตอรี่เป็นประจำ จึงจัดเป็นแบตเตอรี่ที่ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ (maintenance-free) ด้วยเหตุผลดังกล่าวแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาให้มีสมรรถภาพดีขึ้น รวมทั้งสามารถใช้แทนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบดั้งเดิมที่มีอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาพของเหลวได้

ความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมส่งผลกระทบโดยตรงต่อขบวนการ oxygen-recombination cycle และโพลาไรเซชัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องควบคุมและป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป สำหรับข้อดีของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดนี้คือ จำนวนรอบการใช้งานที่ยาวนานกว่า ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ และสามารถนำไปใช้งานอุปกรณ์หลากหลาย เช่น เซลล์สุริยะ ยานยนต์ต่างๆ เป็นต้น

2.5 **เคมีของเจล** (Gel chemistry)

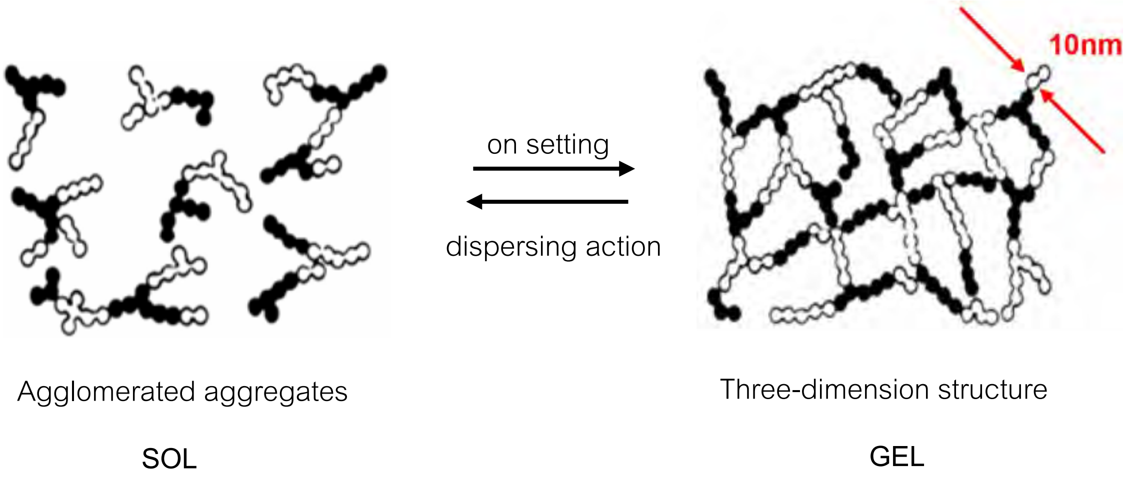
เจล (gel) คือ โครงสร้างสามมิติที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน การสร้างโครงสร้างเจลประกอบด้วยสองขั้นตอนสำคัญ ดังนี้ [20,21]

1. ขั้นตอนการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างอ่อนๆ เป็นขั้นตอนที่ผันกลับได้ โดยซัลเฟตไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคประจุบวกบนผิวซิลิกา (SiO_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาค [21].

2. ขั้นตอนการสร้างพันธะไซโลเซน (Si-O-Si) ที่มีความแข็งแรงระหว่างอนุภาคซิลิกา เป็นขั้นตอนการสร้างโครงสร้างของเจลซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถเกิดการผันกลับได้เมื่อมีแรงมากระทำกับเจล ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างของเจลและการผันกลับของโครงสร้างเจลด้วยพันธะไซโลเซน [21]

โดยขั้นตอนที่สองจะมีความสำคัญมากต่อการเกิดเจล ซึ่งพบว่าอุณหภูมิมีผลอย่างมากตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส เช่น อัตราการเกิดเจลจะมากขึ้นเป็นสองเท่า ทุก ๆ การเพิ่ม

อุณหภูมิขึ้น 10 องศาเซลเซียส และปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของเจล ได้แก่ ค่า pH ชนิดและความเข้มข้นของเกลือ รวมทั้งปริมาณและขนาดอนุภาคซิลิกา [20, 21]

2.5.1 ผลของค่า pH

ค่า pH มีผลต่อประจุบนผิวซิลิกาและค่าศักย์ซีต้า (zeta potential) ที่ค่า pH เท่ากับ 2 ประจุบนผิวมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าค่า pH มากกว่าสอง บนผิวจะมีประจุเป็นลบ เนื่องจากมีหมู่ –SiO- ปรากฏอยู่บนผิวของซิลิกา แต่ในสภาวะที่ค่า pH ต่ำกว่าสอง จะมีหมู่ $-SiOH_2^+$ ที่เกิดจากการไอออไนเซชันของหมู่ซิลานอล (Si-OH) ประจุบวกบนพื้นผิวแทน ส่งผลให้เกิดประจุบวกบนพื้นผิวซิลิกา นอกจากนี้ในกรณีของกรดซัลฟิวริก (ค่า pH น้อยกว่าสอง) พบว่าโปรตอนยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างพันธะไซโลเซนด้วย [20]

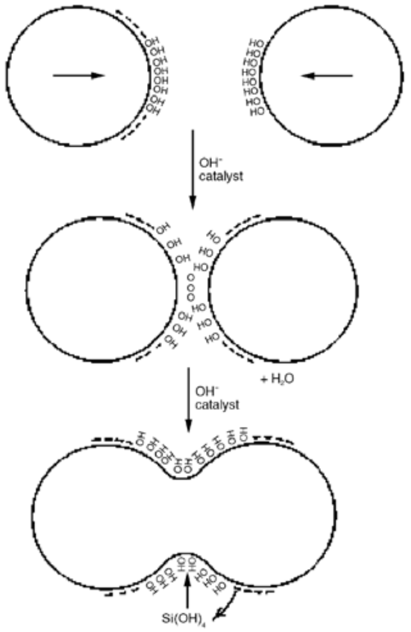
2.5.2 ผลของชนิดและความเข้มข้นของเกลือ

ไอออนบางตัวในระบบ เช่น ซัลเฟตไอออนที่ได้จากการเติมเกลือโซเดียมซัลเฟตลงในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคซิลิกาต่างๆ และช่วยทำให้เกิดเจลได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเกลือจะส่งผลให้ค่าศักย์ซีต้าและแรงผลักระหว่างโมเลกุลของซิลิกาที่อยู่ติดกันมีค่าลดลงทำให้เจลมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเติมโซเดียมซัลเฟตปริมาณ 1.0-2.5% โดยมวล พบว่าสามารถช่วยให้ฟื้นฟูสู่สภาพปกติหลังจากแบตเตอรี่คายประจุจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไอออนร่วม (Common ion effect) ของโซเดียมซัลเฟตที่จำกัดการละลายของตะกั่วซัลเฟตนั่นเอง [20]

2.5.3 ผลของชนิด ปริมาณและขนาดอนุภาคของซิลิกา

ปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเจลแบตเตอรี่ คือ คุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปเจลอิเล็กโทรไลต์จะถูกเตรียมจากสารจำพวกซิลิกา น้ำปราศจากไอออน (deionized water) และสารเติมแต่ง (additives) เช่น โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และพอลิเมอร์ เป็นต้น ชนิดของซิลิกาที่ใช้สำหรับสังเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์จำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ ซิลิกาออกไซด์ (water-glass) ฟูมซิลิกา (fumed silica) และคอลลอยด์ซิลิกา (colloidal silica) โดยชนิดของซิลิกาที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่างส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์และสมรรถภาพของแบตเตอรี่ [20]

การสร้างโครงสร้างเจลในสภาวะที่ค่า pH ต่ำในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด เริ่มจากการรวมตัวของอนุภาคซิลิกาเพื่อสร้างพันธะไซโลเซน โดยมีซัลเฟตไอออนช่วยทำให้เกิดเจลได้ง่ายขึ้น แสดงดังรูป 2.12 นอกจากนี้ชนิดของซิลิกาที่ใช้มีผลโดยตรงต่อโครงสร้างของเจลที่สังเคราะห์ขึ้น



รูปที่ 2.12 การรวมตัวกันของโครงสร้างเจล [20]

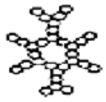
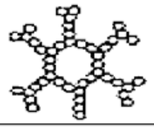
ซิลิกาออกไซด์สามารถสร้างโครงสร้างเจลได้อย่างรวดเร็ว โดยเจลที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ (polymerized structure) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว และเกิดการแยกตัวของของเหลวออกจากเจล นอกจากนั้นอาจมีสิ่งเจือปน เช่น ไอออนของเหล็กและคลอไรด์ ปะปนอยู่ปริมาณมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมฟูมซิลิกาพบว่ามีข้อดี คือ จะช่วยให้แบตเตอรี่มีอายุรอบการใช้งานนานขึ้น แต่ยังคงมีข้อบกพร่องในแง่ของเวลาในการเกิดเจล (gelling time) ที่สั้น เจลที่ได้มีความหนืดสูง ต้นทุนในการผลิตสูง และความต้านทานภายในระบบเพิ่มขึ้น

ในขณะที่เจลที่สังเคราะห์จากคอลลอยด์ซิลิกา พบว่ามีความเสถียรสูง มีความหนืดต่ำ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการแยกของของเหลวออกจากเจล เจลที่สังเคราะห์ได้มีความหนืดเหมาะสม และสามารถควบคุมเวลาในการเกิดเจลได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เตรียมจากคอลลอยด์ซิลิกาจะให้รอบการใช้งานที่สั้นกว่าเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกา [20, 22]

นอกจากนี้ขนาดและปริมาณของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมเจลมีผลต่อคุณภาพของเจลด้วย โดยเกี่ยวข้องกับปริมาตรช่องว่าง (pore volume) และค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของโครงสร้างเจล กล่าวคือ ปริมาณซิลิกาที่มากส่งผลให้ปริมาตรช่องว่างและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโครงสร้างเจลลดลง ผลของความเข้มข้นของซิลิกาต่อโครงสร้างเจลแสดงในตารางที่ 2.1 ในทางอุดมคติควรใช้ปริมาณซิลิกาให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อรักษาสภาพช่องว่างให้มากที่สุด ในขณะเดียวกันก็ควรจะได้เจลที่มีความเสถียร เช่น อนุภาคซิลิกาขนาดใหญ่จะให้ช่องว่างขนาดใหญ่กว่าอนุภาคขนาดเล็ก แต่อนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อย จะส่งผลให้เจลมีความแข็งลดลง ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ขนาดและปริมาณของซิลิกาให้เหมาะสม [20]

ตารางที่ 2.1 ผลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อโครงสร้างเจล [20]

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

2.6 หลักการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้าวิเคราะห์ (electroanalytical chemistry) เป็นการนำหลักการทางเคมีไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ โดยอาศัยหลักการตอบสนองทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารนั้น ทั่วไปจะเป็นการให้สัญญาณไฟฟ้าหนึ่งๆ กับสารตัวอย่าง แล้ววัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าตัวอื่นของสารละลาย

ทั่วไปอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าประกอบด้วย potentiostat วงจรวัดกระแสไฟฟ้า โดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode, WE) คือขั้วไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode, RE) มีใช้วัดค่าความต่าง

ศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน และขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode, CE) ใช้เพื่อให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีครบวงจร

เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้ามีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีโวลแทมเมทรี (voltammetry)

2.6.1 หลักการของโวลแทมเมทรี

โวลแทมเมทรี (voltammetry) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมศักย์ไฟฟ้า จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าทำงานของเซลล์เคมีไฟฟ้าเทียบกับศักย์ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยจะทำการวัดกระแสของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไปตามความต่างศักย์ภายนอกที่ให้เข้าไป (รู้ได้โดยวัดศักย์ของขั้วนั้นเทียบกับขั้วอ้างอิง) การที่ขั้วมีการเปลี่ยนแปลงศักย์จะทำให้สารเคมีในสารละลายของเซลล์สามารถมารับ (หรือมาให้) อิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดเป็นสปีชีส์ใหม่ นั่นคือเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือ electron transfer reaction นั่นเอง อิเล็กตรอนข้างต้นจะไหลผ่านวงจรไฟฟ้าและไปเกิดคู่ปฏิกิริยาตรงข้ามที่อีกขั้วหนึ่ง ดังนั้นจึงวัดออกมาเป็นกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ได้มาเขียนกราฟ โดยให้กระแสเป็นแกน y และความต่างศักย์เป็นแกน x เรียกกราฟนี้ว่า voltammogram (volt-amp-diagram) หรือ polarogram (polarization-diagram)

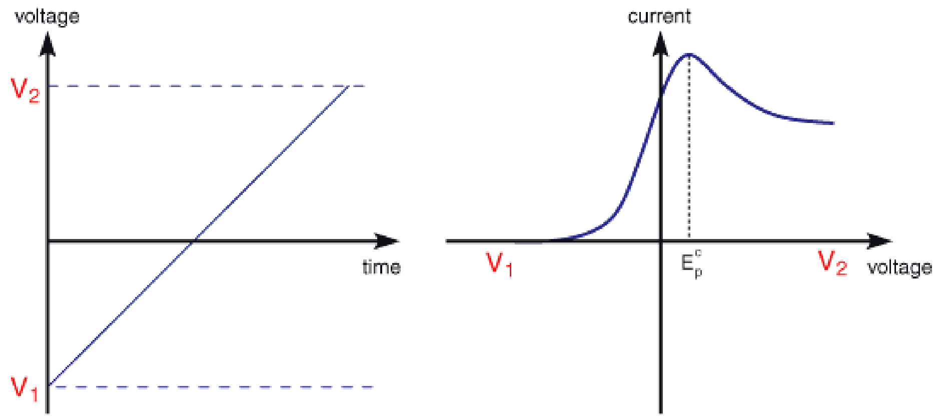
จากกฎของฟาราเดย์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี พบว่าถ้ามีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น จะหมายถึงมีกระแสไฟฟ้าไหลในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศึกษา ($I \neq 0$) และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผันตามกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ที่ควบคุม [23, 24]

2.6.2 เทคนิคสำคัญของการวิเคราะห์ในกลุ่มโวลแทมเมทรี

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

การวิเคราะห์แบบ linear scan voltammetry (LSV) นั่นคือ การควบคุมศักย์ไฟฟ้าของวงจรให้เปลี่ยนแปลงจากศักย์ค่าหนึ่ง (V_1) ไปยังศักย์อีกค่าหนึ่ง (V_2) ในอัตราเร็ว (scan rate) ที่คงที่หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มศักย์อย่างเป็นเส้นตรงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.13 ก) โดยกระแสที่วัดได้จากการเปลี่ยนความต่างศักย์จนช่วงดังกล่าวสามารถแสดงดังรูปที่ 2.13 ข)

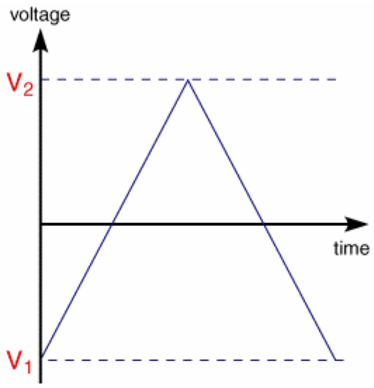
ก) ข)



รูปที่ 2.13 โพลาโรกราฟีแบบเส้นตรง [24]

2.6.3.2 **ไซคลิกโวลแทมเมทรี** (Cyclic Voltammetry,CV)

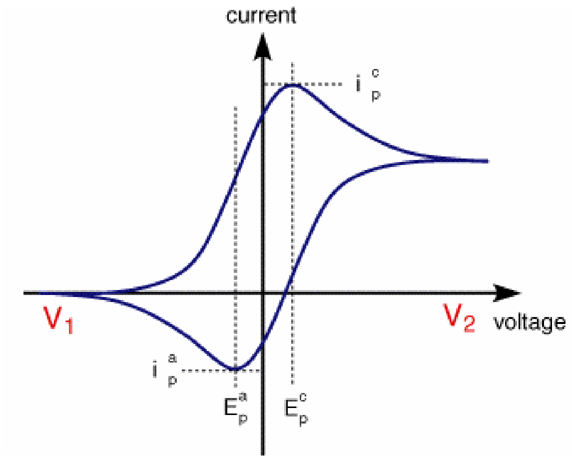
ไซคลิกโวลแทมเมทรีมีความคล้ายคลึงกับวิธีการ LSV แต่ในกรณีนี้จะทำการสแกน 2 ครั้งในลักษณะไป-กลับด้วยอัตราคงที่ โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าจาก V_1 ไปยัง V_2 ในการสแกนไปข้างหน้า และจาก V_2 สู่ V_1 อีกครั้งเมื่อทำการสแกนกลับ ดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 สัญญาณความต่างศักย์ที่ให้กับไซคลิกโวลแทมเมทรี [24]

เมื่อทำการสแกนไปข้างหน้าพบว่ากราฟมีลักษณะเช่นเดียวกับผลของ LSV เมื่อสแกนย้อนกลับผ่านตำแหน่งสมดุลจะได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส พบว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลจากสารละลายไปยังอิเล็กโทรด และเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้าม แต่สามารถใช้

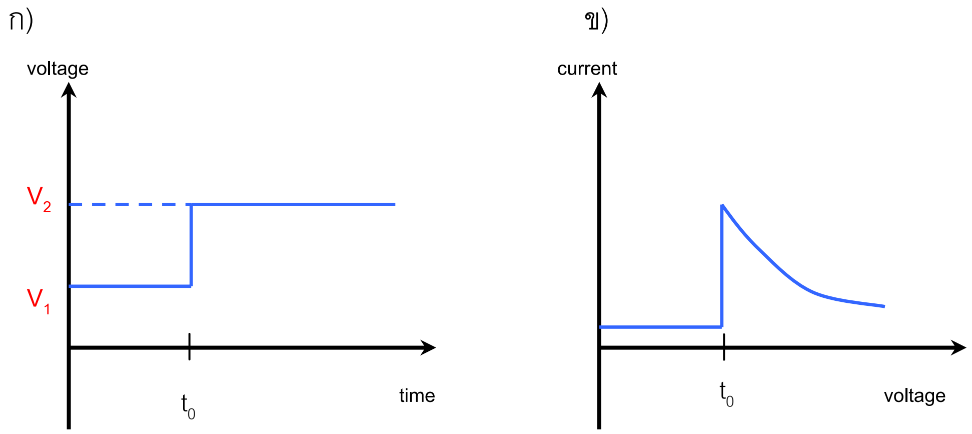
อธิบายพฤติกรรมของปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกันสำหรับปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่ผันกลับได้ ผลจากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม [24]

2.6.3.3 **แอมแปโรเมทรี** (Amperometry)

เทคนิคแอมแปโรเมทรี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยให้ศักย์คงที่แก่ขั้วไฟฟ้าใช้งานตลอดการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ก) โดยค่าศักย์ที่ให้แก่วงจรนั้น ต้องมีค่าที่เพียงพอ ที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคแอมแปโรเมทรี แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ข)



รูปที่ 2.16 สัญญาณแอมแปโรเมทรี [24]

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป($t > t_0$) กระแสจะลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง หรืออาจไม่มีสารตั้งต้นเหลืออยู่เลยก็เป็นได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Behzad **และคณะ ในปี** 2009 [25] ศึกษาปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของสารเติมแต่งไออนิกเหลว ได้แก่ ไทรเอทิลแอมโมเนียมไฮโดรเจนซัลเฟต (Triethyl ammonium hydrogen sulfate) ไดบิวทิลแอมโมเนียมไฮโดรเจนซัลเฟต (Dibutyl ammonium hydrogen sulfate) แบนซิลแอมโมเนียมไฮโดรเจนซัลเฟต (Benzylammonium hydrogen sulfate) และ อิมมิดาโซเลียมไฮโดรเจนซัลเฟต (1-butyl-3-methylimidazolium hydrogen sulfate) เมื่อเติมลงในอิเล็กโทรไลต์เหลว โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ พบว่าสารเติมแต่งไอออนนิกเหลวเหล่านี้ช่วยลดการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและจะช่วยได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งเหล่านี้ แต่ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเจน

Kumar **และ** Sekhon **ในปี** 2008 [26] ศึกษาการปรับปรุงค่าการนำโปรตอนในพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยกรดอ่อน (กรดออโตไฮดรอกซี แบโซอิก, O-OHBA) โดยมีพอลีเมทิวเมธาอาคีเลต (PMMA) ไดเมทิวแอสซิแทมไมด (DMA) และฟูมซิลิกาเป็นสารเติมแต่ง พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ถูกสังเคราะห์โดยฟูมซิลิกาขนาดนาโน PMMA O-OHBA และ DMA โดยทำการศึกษาค่าความเข้มข้นกรด ปริมาณและมวลโมเลกุล (MW) สารเติมแต่งพอลีเมทิวเมธาอาคีเลต (MW = 15000, 120,000, 996,000) และปริมาณฟูมซิลิกาที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า พบว่าความเข้มข้นกรดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การเติมสารเติมแต่งพอลีเมทิวเมธาอาคีเลตส่งผลให้ค่าการนำฟ้าเพิ่มขึ้น โดยสารเติมแต่งพอลีเมทิวเมธาอาคีเลต 3 %w/t และ MW = 15,000 จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด และการเติมสารเติมแต่งฟูมซิลิกาส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณฟูมซิลิกาที่ 1%wt และ 8%wt จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด

Petkova **และคณะ ในปี** 2006 [6] ศึกษาผลกระทบของสารเติมแต่งโพลีแอสพาเทต (Polyaspartate, PASP) ในงานวิจันนี้ทำการเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดเปียก ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโพลีแอสพาเทตกับแบตเตอรี่เปียกที่เติมลงในอิเล็กโทรไลต์และแผ่นไฟฟ้าขั้วลบ 0.1% wt พบว่าการเติมโพลีแอสพาเทตลงในอิเล็กโทรไลต์และแผ่นขั้วลบ ส่งผลต่อกระบวนการเกิดซัลเฟต โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างของซัลเฟตให้มีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังให้ค่าการคายประจุของแบตเตอรี่และรอบอายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

Zheng **และคณะในปี** 2006 [27] ศึกษาคุณสมบัติของเจลที่เตรียมจากพอลีไซโลเซน (PBGE) เทียบกับเจลที่เตรียมจากคอลลลอย์ซิลิกา (CSGE) เพื่อใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบ

วาล์วควบคุม ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) ไซคลิกโวลแทมเมททรี (Cyclic voltammetry, CV) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงความเสถียรและขนาดอนุภาคของ PBGE ที่อยู่ระหว่าง 30 ถึง 50 นาโนเมตร การศึกษาคุณสมบัติของวัฏจักรเริ่มต้นของแบตเตอรี่ผสมระหว่างแผ่นดูดซึมชนิดใยแก้ว (AGM) กับ PBGE (AGM-PBGE) และแผ่นดูดซึมชนิดใยแก้วกับคอลลอยด์ซิลิกาเจล (AGM-CSGE) โดยอาศัยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) พบว่าการเติม PBGE ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุแผ่นธาตุบวก (Positive active material, PAM) รวมทั้งเพิ่มความจุของแบตเตอรี่ ในแบตเตอรี่ผสมระหว่าง AGM-PBGE เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ผสมระหว่าง AGM-CSGE ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบรอบการคายประจุไฟฟ้าเกินของแบตเตอรี่ผสม AGM-PBGE แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในการประจุและคายประจุที่เหนือกว่าภายใต้สภาวะการประจุไฟฟ้าบางส่วน (Partial-stage-of-charge, PSoC) นอกจากนี้ยังพบว่าเป็นการเพิ่มศักยภาพทางเคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่ผสม AGM-PBGE เนื่องจากมีประสิทธิภาพการคายประจุสูงกว่า มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า ซึ่งเป็นผลของความต้านทานภายในระบบต่ำและโครงร่างเปิดสามมิติของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บ่งชี้ว่าการอ่อนตัวลงและการกระจายของแผ่นธาตุบวก เป็นสาเหตุหลักของความล้มเหลวของแบตเตอรี่ผสมทั้งสองชนิด

Karimi **และคณะ ในปี** 2006 [5] ศึกษาผลการเติมโซเดียมซัลเฟตปริมาณต่างๆลงในขั้วไฟฟ้าด้านลบต่อสรรมถนะของแบตเตอรี่ โดยศึกษาค่าความจุในการคายประจุ รอบการใช้งาน และความสามารถในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ (cold cranking) ในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบเปียก พบว่าแบตเตอรี่ที่ผสมโซเดียมซัลเฟต 0.1%wt (โดยคิดจากน้ำหนักของ PbO_2) จะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้น 3% อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น 18% ความจุไฟฟ้าเมื่ออายุการใช้งานสุดท้ายเพิ่มขึ้น 12% และเพิ่มการทำงานที่อุณหภูมิต่ำๆ 17%

Yonglang **และคณะ ในปี** 2006 [28] ศึกษาสมรรถภาพการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดชนิดเจล แบบวาล์วควบคุม (VRLA) เมื่อแบตเตอรี่ถูกตั้งทิ้งไว้นาน 3 ปี โดยเจลอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากกรดซัลฟิวริก 1.300 กรัมต่อลูกบาศก์ กับฟูมซิลิกา 5 %wt หลังจากทิ้งไว้นานเกือบ 3 ปี พบว่าโครงสร้าง ความต้านทาน และชั้นการกัดกร่อนของแผ่นขั้วบวกในแบตเตอรี่ ไม่ได้รับผลกระทบมากนัก ส่วนแผ่นขั้วลบศักย์ไฟฟ้าของการเพิ่มขึ้นของก๊าซไฮโดรเจนในเจลเซลล์มีค่าเป็นลบมากกว่าใน AGM cell จึงส่งผลให้เจลเซลล์มีอัตราการคลายกระแสเองเกิดขึ้นช้ากว่า อย่างไรก็ตาม การสะสมของตะกั่วซัลเฟตขนาดใหญ่มีเล็กน้อย จึงทำให้ความ

ต้านทานและ ศักย์ไฟฟ้าเกินของการคลายกระแสเองของแผ่นขั้วลบเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลพอต่อการจำกัดความจุของแบตเตอรี่ชนิดเจล จึงสามารถนำเจลแบตเตอรี่กลับมาอัดประจุได้อีก

Hern'andez **และคณะ ในปี** 2005 [22] ทำการศึกษาสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมเพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ภายใต้สภาวะการประจุไฟฟ้าบางส่วน ในงานวิจัยนี้สนใจเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นจากฟูมซิลิกาและคอลลอยด์ซิลิกา ที่มีส่วนประกอบของกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้มีการใส่สารเติมแต่ง ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต(Na_2SO_4) 15 กรัมต่อลิตร และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) 3 กรัมต่อลิตร สารทั้งสองเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการประจุไฟฟ้าเพื่อนำกลับมาใช้ได้อีก จากการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจล โดยการหย่อนลูกบอลตะกั่วขนาด 3 มิลลิเมตร พบว่า

1. เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการเกิดเจลสั้นลง
2. เมื่อความเข้มข้นของซิลิกาเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลง
3. มีความเป็นไปได้เมื่อลดอุณหภูมิเริ่มต้นของกรดจะส่งผลให้อัตราการเกิดเจลลดลง
4. ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก จะส่งผลให้อัตราการเกิดเจลสูงขึ้น
5. โดยทั่วไปส่วนประกอบคอลลอยด์ซิลิกาต้องการระยะเวลาในการเกิดโครงสร้างเจลน้อยกว่าส่วนประกอบฟูมซิลิกา

การทดสอบสมรรถนะแบตเตอรี่ตอนเริ่มต้น พบว่าแบตเตอรี่แบบเจลจะมีความจุประจุน้อยกว่าแบตเตอรี่แบบของเหลว แต่จะให้จำนวนรอบอายุการใช้งานมากกว่าแบบของเหลวภายใต้กระบวนการอัดประจุเพียงบางส่วนที่อัตราเร็วปานกกลาง (low-moderate (C/3) and moderate DOD (17.5%)) โดยแบตเตอรี่แบบเจลที่มีเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาให้อายุรอบการใช้งานที่มากกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากคอลลอยด์ซิลิกา

Park **และคณะ ในปี** 2005 [29] ศึกษาหาองค์ประกอบที่เหมาะสมของซิลิกาขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร กรดซัลฟิวริก อุณหภูมิ และปริมาณพอลิแอคริลาไมด์ที่เหมาะสมต่อความแข็งของเจล (gel strength) และอัตราในการเกิดเจล (gelation time) โดยใช้ซิลิกาในช่วง 2-15 %w/v ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 15 และ 38%w/v โดยวัดค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus) พบว่ายิ่งค่าโมดูลัสสะสมมีค่ามากเจลก็จะมีความแข็งมาก และเมื่อปริมาณของซิลิกามากขึ้น การใช้กรดซัลฟิวริก 38%w/v จะทำให้เจลแข็งมากกว่าการใช้กรดซัลฟิวริก15%w/v แต่ในขณะเดียวกันยิ่งปริมาณของซิลิกามากขึ้นเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลก็มากขึ้นด้วย กรดซัลฟิวริก 38 %w/v จะแข็งตัวเร็วที่อุณหภูมิสูง ส่วนกรดซัลฟิวริก15%w/v จะแข็งตัวได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำ โดยปริมาณพอลิแอคริลาไมด์มากเจลจะแข็งมากแต่เวลาที่ใช้ในการเกิดเจลก็สูงขึ้นด้วย

Dietz **และคณะ ในปี** 1994 [7] ศึกษาหมู่แทนที่ต่างๆของเบนซัลดีไฮด์ (substituted benzaldehydes) ที่เติมลงในอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีพบว่า หมู่แทนที่

ต่างๆของเบนซัลดีไฮด์เป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจน และจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนได้มากขึ้นปริมาณการเติมเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการสูญเสียน้ำภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเมื่อผ่านการทดสอบจำนวนรอบอายุการใช้งาน พบว่าแบตเตอรี่ที่ทำการเติมหมู่แทนที่ต่างๆของเบนซัลดีไฮด์ช่วยลดการสูญเสียน้ำถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งเบนซัลดีไฮด์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งที่การคิดค้นและศึกษาสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมต่อแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุม โดยสามารถนำสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่พัฒนาได้ใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาและเป็นต้นแบบในการผลิตต่อไป สำหรับในบทนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 ส่วน ในส่วนแรกเป็นส่วนของสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนที่สองกล่าวถึงวิธีการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ส่วนที่สามเป็นการทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นและในส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 95-97 โดยมวล QReC
2. ฟูมซิลิกา (ขนาดอนุภาค 12nm)
3. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) Ajax Finechempty
4. วานิลลิน (Vanillin) Sigma – Aldrich
5. สารประกอบแอลดิไฮด์ Aldrich
6. พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MW = 15,000) Aldrich
7. พอลิแอคริลาไมด์ (Polyacrylamide, MW = 6 x 10^6) Aldrich
8. พอลิพิร์โรล (Polypyrrole) Aldrich

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องกวนสามารถปรับความเร็วรอบได้
2. ใบกวนที่ทำจากวัสดุที่ทนต่อกรดเข้มข้น(เทปลอน)
3. ตู้ระบบปิด (Glove box)
4. ตู้ดูดควัน (Hood)
5. เครื่องชั่งความละเอียด 4 และ 2 ตำแหน่ง

6. นาฬิกาจับเวลา
7. เทอร์โมมิเตอร์
8. หน้ากากกันสารเคมีชนิดป้องกันพิเศษ
9. ถุงมือยาง
10. บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 250 และ 1000 มิลลิลิตร
11. ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 และ 1000 มิลลิลิตร
12. ปิเปตขนาด 1,5,10,25 มิลลิลิตร
13. กระบอกตวงปริมาตร 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
14. กรวยแก้ว
15. หลอดหยด กระจกนาฬิกา และช้อนตักสาร
16. ภาชนะปิดสำหรับบรรจุฟูมซิลิกา
17. ขวดที่มีฝาปิดปริมาตร 250 และ 1000 มิลลิลิตร
18. ไฮโดรมิเตอร์
19. ลูกตะกั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร
20. แผ่นตะกั่วบริสุทธิ์ร้อยละ 98
21. ขั้วทองคำขาว (Pt)
22. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl
23. ท่อหดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร (Ø= 4.5 cm.)
24. กระดาษทรายน้ำเบอร์ 800, 1500 และ 2000
25. แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบขนาด ขนาด 4 และ 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ จาก ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. Potentionstat/Galvanostat: Autolab Module PGSTA30 ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. เครื่องเติมน้ำกรดสูญญากาศ ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่
3. ชุดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถภาพแบตเตอรี่
    - เครื่อง UBA4 โดยโปรแกรม Universal battery analyzer Version 0.9.9.0A3 ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่

- เครื่อง Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่

3.2 วิธีการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์

1. เตรียมกรดซัลฟิวริกให้มีความเข้มข้น 1.325 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามปริมาตรที่ต้องการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์
2. เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร ลงในกรดซัลฟิวริกที่เตรียมได้จากข้อ 1
3. เติมสารเติมแต่งๆ ลงในสารละลายที่ได้จากข้อ 2 ตามปริมาตรที่ต้องการ สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิแอคริลาไมด์ พอลิพิร-โรล สารประกอบแอลดิไฮด์ และวานิลลิน
4. ตักฟูมซิลิกาลงในขวดที่มีฝาปิดตามปริมาณที่ต้องการเตรียม จากนั้นเติมสารละลายในข้อ 3 ลงในขวดดังกล่าว
5. นำสารผสมที่ได้จากข้อ 4 มากวนโดยใช้ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
6. เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้ในข้อ 5 นำไปทดสอบต่อไป

ภาชนะและเครื่องมือสำหรับเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์แสดงดังรูปที่ 3.1

ก)

ข)

รูปที่ 3.1 ภาชนะและเครื่องมือสำหรับเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ (ก) ภาชนะสำหรับเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ และ (ข) เครื่องมือสำหรับผสมเจลอิเล็กโทรไลต์และลักษณะอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของอิเล็กโทรไลต์

การทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเกิดเจลและความแข็งของเจล อีกส่วนหนึ่ง คือการทดสอบปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

3.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล (Gelling time)

ระยะเวลาในการเกิดเจลเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่ กล่าวคือ เจลที่ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้น ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จะมีลักษณะที่หนืดกว่าเจลที่ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่นาน จึงส่งผลให้ยากต่อกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหาระยะเวลาในการเกิดเจลที่เหมาะสมสำหรับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่จะเติมลงในแบตเตอรี่ สำหรับในงานวิจัยนี้ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล 2 ปัจจัย คือ ผลของปริมาณฟูมซิลิกา และผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์

3.3.1.1 ผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

1. เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ตามขั้นตอน 3.2 โดยใช้กรดซัลฟิวริกปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาตรฟูมซิลิกา 3 กรัม (3%w/v) ขวดสำหรับเตรียมมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร
2. นำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มาเทลงในบีกเกอร์ขนาดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้มีความสูง 4.7 เซนติเมตร (ประมาณ 80 มิลลิลิตร)
3. ทดสอบหาระยะเวลาในการเกิดเจล โดยการหย่อนลูกตะกั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ทุกๆ 20 นาที จดบันทึกระยะทางที่ลูกตะกั่วสามารถเคลื่อนที่ได้ จนกระทั่งระยะทางไม่มีการเปลี่ยนแปลง เป็นจำนวน 3 ครั้ง หรือเมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง
4. ทิ้งเจลอิเล็กโทรไลต์ไว้ 24 ชั่วโมงและทำการหย่อนลูกตะกั่วอีกครั้งหนึ่ง เพื่อหาค่าความแข็งตัวของเจลอิเล็กโทรไลต์นั้น จดบันทึกระยะทางที่ลูกตะกั่วสามารถเคลื่อนที่ได้
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 4 แต่เปลี่ยนปริมาตรฟูมซิลิกาเป็น 4 (4%w/v), 5 (%w/v) และ 6 (%w/v) กรัมตามลำดับ

3.3.1.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

1. เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ตามขั้นตอน 3.3.1.1 โดยใช้ปริมาตรฟูมซิลิกา 5 กรัม (5%w/v) สารเติมแต่งวานิลลินปริมาตร 0.5 กรัม (0. 5%w/v)
2. ทำการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลและความแข็งของเจลเช่นเดียวกับ 3.3.1.1
3. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 2 แต่เปลี่ยนปริมาณสารเติมแต่งวานิลลิน 0.005 กรัม
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 2 แต่เปลี่ยนปริมาณฟูมซิลิกาเป็น 4 กรัม และสารเติมแต่งวานิลลิน 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 กรัมตามลำดับ
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 2 แต่เปลี่ยนปริมาณฟูมซิลิกาเป็น 3 กรัมและสารเติมแต่งวานิลลิน 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 และ 0.5 กรัมตามลำดับ
6. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 5 แต่เปลี่ยนเป็นสารประกอบแอลดิไฮด์
7. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 5 แต่เปลี่ยนเป็นสารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์
8. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1แต่เปลี่ยนเป็นสารเติมแต่งเมทิลเมทาคริเลต
9. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1แต่เปลี่ยนเป็นสารเติมแต่งพอลิพิร์โรล

ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลแสดงในรูปที่ 3.2

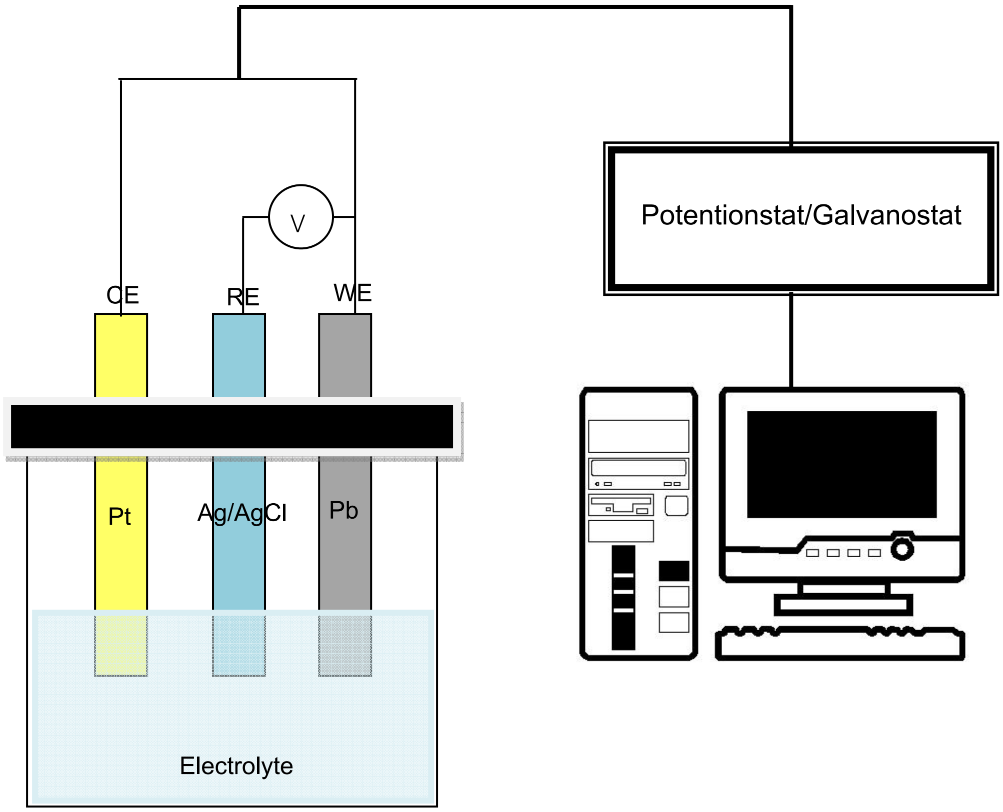
รูปที่ 3.2 ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจล

3.3.2 การวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนภายในแบตเตอรี่นั้น หมายถึง ปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำระหว่างการอัดประจุเกินขนาดให้กับแบตเตอรี่ หากปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ง่ายและเร็วจะส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง ในการทดลองนี้ใช้เครื่อง Potentionstat/Galvanostat โปรแกรม Electrochemical Spectroscopy (GPES) ในการวิเคราะห์ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว

โดยใช้ตะกั่ว (Pb) เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode, WE) แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode, CE) และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode,RE)เป็น Ag/AgCl ทำการสแกนจาก –2.5 ถึง 3.0 โวลต์ ด้วยอัตรา 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้เครื่อง Potentionstat/Galvanostat แผนภาพแสดงดังรูปที่ 3.3

สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาวิเคราะห์ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยเทคนิคไซคริกโวลแทมเมทรีแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทดสอบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว ด้วยเทคนิคไซคริกโวลแทมเมทรี

3.3.2.1 **ขั้นตอนการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์**

1. เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ตามขั้นตอน 3.2 ในขวดปริมาตร 250 มิลลิลิตร ใช้กรดซัลฟิวริกปริมาตร 150 มิลลิลิตร
2. ทิ้งเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในข้อ 1 ให้อยู่นิ่งเป็นระยะเวลา 5 วัน
3. นำเจลเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในข้อ 2 ทำการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.1 อิเล็กโทรไลต์เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ ที่นำมาทดสอบด้วยเทคนิคไซคริกโวลแทมเมทรี

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
เจล	➢ ไม่มีสารเติมแต่ง	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4 and 13.25 g/L of Na_2SO_4 ➢ 3 %w/v of fumed silica ➢ 4 %w/v of fumed silica ➢ 5 %w/v of fumed silica
	➢ พอลิแอคริลาไมด์	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4 and 13.25 g/L of Na_2SO_4 ➢ 5 %(w/v) of fumed silica - 0.005 % w/v - 0.01 % w/v - 0.05 % w/v
	➢ พอลิพิร์โรล	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4 and 13.25 g/L of Na_2SO_4 ➢ 5 %(w/v) of fumed silica - 0.005 % w/v - 0.01 % w/v - 0.05 % w/v

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) อิเล็กโทรไลต์เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ ที่นำมาทดสอบด้วยเทคนิคไซคริกโวลแทมเมทรี

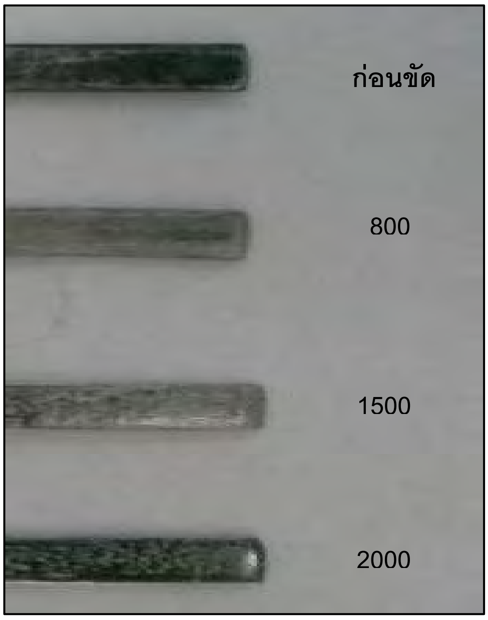
สถานะ	อิเล็กโทรไลต์	องค์ประกอบ
เจล	➢ สารประกอบแอลดิไฮด์	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4 and 13.25 g/L of Na_2SO_4 ➢ 4 %(w/v) of fumed silica - 0.005 %w/v - 0.01 %w/v
	➢ เวนนิลิน	1.325 g/cm^3 of H_2SO_4 and 13.25 g/L of Na_2SO_4 ➢ 4 %(w/v) of fumed silica - 0.005 %w/v - 0.01 %w/v - 0.03 %w/v

3.3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วทำงาน

1. ขั้วทำงานเตรียมจากแผ่นตะกั่วบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ตัดให้มีขนาด 0.5 x 15 เซนติเมตร
2. เตรียมพื้นผิวขั้วทำงานโดยขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 800, 1500 และ 2000 ตามลำดับ
3. ตัดท่อหดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร ให้ยาว 1 เซนติเมตร สำหรับกำหนดพื้นที่ขั้วทำงานให้มีขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตร (0.5 x 1.0 เซนติเมตร)
4. เช็ดให้สะอาดและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
5. นำขั้วที่สะอาดมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 30 นาที

สำหรับขั้วทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.3

ก)



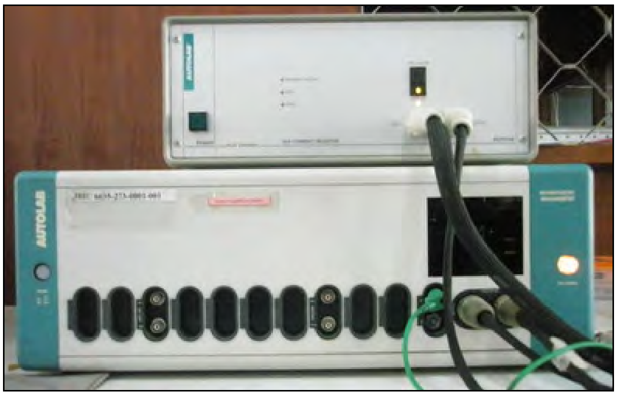
ข)

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (ก) พื้นผิวขั้วไฟฟ้าทำงานเมื่อขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ (ข) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์

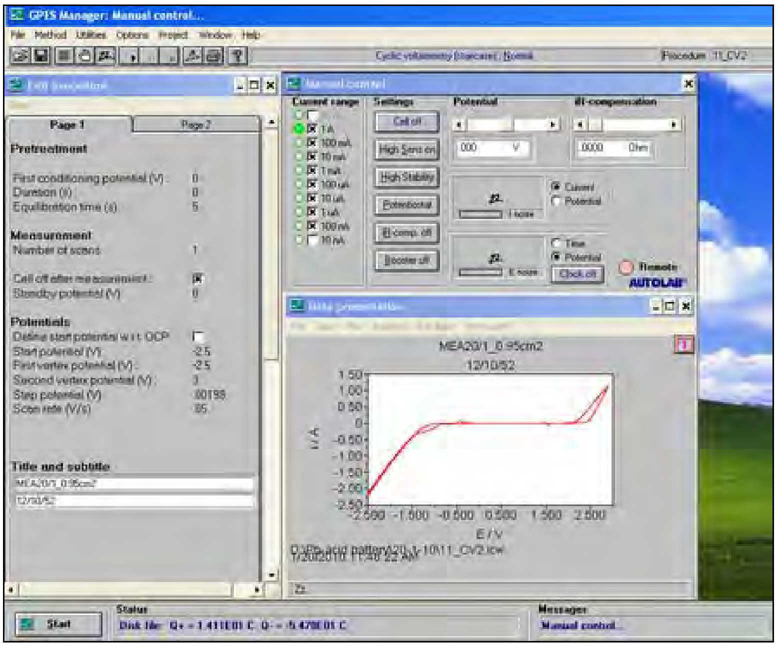
3.3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. เปิดสวิตซ์เครื่อง Potentionstat/Galvanostat ก่อนทำการทดลอง กดปุ่ม Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด เครื่องมือ Potentionstat/Galvanostat แสดงในรูปที่ 3.4
2. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentionstat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม GPES เลือก Cyclic voltammetry (staircase) และเลือก Normal จากนั้นตั้งค่าความต่างศักดิ์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง -2.5 ถึง 3.0 โวลต์ และค่า Scan rate ที่ 50 mV/sec โปรแกรมที่ใช้งานแสดงในรูปที่ 3.5
3. ทำการต่อขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เข้ากับชุดการทดสอบ Potentiostat/Galvanostat โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ ดังแสดงในตาราง 3.2 จัดตำแหน่งขั้วไฟฟ้าโดยให้ขั้วอ้างอิงอยู่ตรงกลาง โดยไม่ให้ขั้วแต่ละขั้วชนกัน เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรได้
4. กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด จากนั้นกดปุ่ม Start โปรแกรมจะเริ่มทำงาน

5. ทำการบันทึกข้อมูล ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat
6. เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานให้ปิด Cell Enable ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่อหยุดการทำงานของเซลล์
7. ปิดโปรแกรม GPES แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นปิดสวิตซ์ที่ตัวเครื่อง



รูปที่ 3.5 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PGSTA30 ของบริษัท AUTOLAB



รูปที่ 3.6 หน้าต่างโปรแกรม GPES ของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat

3.4. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

. ในวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญกับการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนหลัก ในส่วนแรกให้ความสำคัญกับการนำแบตเตอรี่ไปใช้งาน ในงานวิจัยนี้ใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุม ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดการใช้งานแบบอยู่กับที่ ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ (ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่) โดยทั่วไปแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและหลายรูปแบบ อาทิ ใช้ในเครื่องสำรองไฟ (UPS) ไฟสำรองฉุกเฉิน (Emergency light) ไฟต่างๆ ที่ใช้ในท้องถนน(Solar street light) ซึ่งสามารถอัดประจุ (Charge) โดยพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น จากสภาวะการใช้งานจึงแบ่งการทดสอบการหาค่าความจุในการคายประจุจนหมด(100% DOD) ออกเป็น 2 อัตราเร็ว คือ การใช้งานแบบการคายประจุที่อัตราเร็วต่ำ (Low-rate discharge, 10 hr) และการใช้งานแบบการคายประจุที่อัตราเร็วสูง (High-rate discharge, 1 hr) นอกจากนี้สูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ให้สมรรถนะดีที่สุด จะนำมาเปรียบเทียบกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปทางการค้าโดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ (ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่) ทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง สาเหตุที่ต้องขยายขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบเทียบกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้า เนื่องจากเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าปัจจุบันไม่มีการผลิตในขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์นั่นเอง และในส่วนที่สองได้ให้ความสำคัญกับสมรรถนะของแบตเตอรี่หลังการเก็บ (Shelf storage) หรือการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ (Self discharge) ด้วย

3.4.1 การทดสอบหาค่าความจุการคายประจุของแบตเตอรี่

ในขั้นตอนการเติมแบตเตอรี่ใช้เครื่องเติมน้ำกรดชนิดสูญญากาศ (ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่) แบตเตอรี่ที่เติมอิเล็กโทรไลต์เรียบร้อยแล้วจะทิ้งไว้ 1 คืนก่อนการนำมาทดสอบ

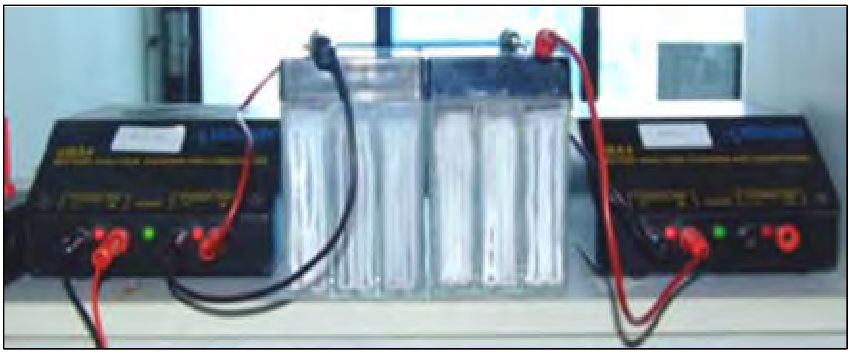
3.4.1.1 การทดสอบอัตราการคายประจุต่ำ (Low-rate discharge, 10 hr rate)

1. เปิดสวิตซ์เครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบแบตเตอรี่เครื่อง UBA 4 แสดงในรูปที่ 3.6
2. เปิดโปรแกรม UBA 4 (Universal battery analyzer Version 0.9.9.0A3)

3. เลือก File และเลือก Battery Analysis Routine Designer ออกแบบโปรแกรมที่ใช้ทดสอบแบตเตอรี่ โปรแกรมขั้นตอนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.2 จากนั้นบันทึกโปรแกรมที่สร้างไว้
4. ต่อชุดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถภาพแบตเตอรี่เข้ากับแบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ
5. เลือก Instrument และ Battery Analyzer จากนั้นเลือก Unit ของเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ
6. ใส่ค่าจำนวนช่องของแบตเตอรี่เท่ากับ 6 ค่าความจุแบตเตอรี่เท่ากับ 4 Ah เลือกโปรแกรมที่ใช้ทดสอบในข้อ 4 จากนั้นเลือกแฟ้มที่ต้องการเก็บข้อมูลที่ทดสอบได้
7. กดปุ่ม Start เครื่องจะเริ่มการทำงานตามที่ได้ตั้งโปรแกรมไว้
8. โปรแกรมจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ พร้อมทั้งแสดงค่าความจุของแบตเตอรี่ในขั้นตอนการอัดและคายประจุ
9. หลังการทดสอบสิ้นสุดทำการปิดโปรแกรม UBA 4 และปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ตามลำดับ

<u>หมายเหตุ</u> 1. การอัดประจุลงในแบตเตอรี่และคายประจุออกทั้งหมด เรียกว่า การทดสอบ 1 รอบ

2. การอัดประจุ (0.8 A/14.1 V/7 hr) หมายถึง ใช้การแสไฟฟ้าในการอัดประจุที่ 0.8 แอมป์แปร์ กำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าถึง 14.1 โวลต์ ใช้ระยะเวลาในการอัดประจุทั้งหมด 7 ชั่วโมง
3. การคายประจุ (0.4 A/10.5 V) หมายถึง ดึงการแสไฟฟ้าในการคายประจุที่ 0.4 แอมป์แปร์ จนกระทั่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงถึง 10.5 โวลต์



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ UBA 4 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุต่ำ (อัตราการคายประจุ 10 ชั่วโมง)

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง [30]

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (0.8A/14.1 V/7 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (0.4 A/10.5 V)
4	อัดประจุ (0.8A/14.1 V/11 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 เป็นจำนวน 6 ครั้ง
6	พัก (24 hr)
7	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 เป็นจำนวน 8 ครั้ง

3.4.1.2 **การทดสอบอัตราการคายประจุสูง** (High-rate discharge, 1 hr rate)

1. เปิดสวิตซ์เครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบแบตเตอรี่เครื่อง Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 แสดงในรูปที่ 3.7
2. เปิดโปรแกรม XHKSN จากนั้นเลือกเครื่องทดสอบที่ต้องการ
3. ต่อชุดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถภาพแบตเตอรี่เข้ากับแบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ
4. คลิกขวาเลือก Program Edit ทำการเขียนโปรแกรมที่ต้องการทดสอบแบตเตอรี่สำหรับขั้นตอนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.3 สำหรับแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง และตารางที่ 3.4 สำหรับแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง จากนั้นบันทึกโปรแกรมที่สร้างไว้
5. คลิกขวาที่ช่องเครื่องที่ต้องการทดสอบ และกดปุ่ม Start (F3) เครื่องจะเริ่มการทำงานตามที่ได้โปรแกรมไว้
6. โปรแกรมจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ระยะเวลาต่างๆ ทั้งการอัดประจุและการค่ายประจุและบอกค่าความจุของแบตเตอรี่ทั้งช่วงการอัดและคายประจุ

7. หลังการทดสอบสิ้นสุดทำการปิดโปรแกรม XHKSN และปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ตามลำดับ

รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุสูง (อัตราการคายประจุ 1 ชั่วโมง)

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดของเหลวและเจล (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง [30]

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (1 A/14.1 V/9 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (4 A/9.6 V)
4	อัดประจุ (1 A/14.1 V/9 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 เป็นจำนวน 15 ครั้ง
6	พัก (24 hr)
7	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 เป็นจำนวน 15 ครั้ง

ตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าและที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง [30]

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 เป็นจำนวน 15 ครั้ง
6	พัก (24 hr)
7	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 เป็นจำนวน 15 ครั้ง

3.4.2 **การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง** (Self discharge)

1. หลังการทดสอบอัตราการคายประจุต่ำตามข้อ 3.4.1.1 เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทำการบันทึกค่าความต่างศักย์เริ่มต้น
2. ทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทุกๆ 1 สัปดาห์ โดยใช้เครื่อง UBA 4 เลือก Instrument และ Digital voltage จากนั้นเลือก Unit ของเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ที่ใช้ในการวัดค่า
3. ต่อสายไฟเข้ากับแบตเตอรี่ เครื่องจะทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
4. บันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้
5. เทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เป็นร้อยละความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ดังแสดงในตารางที่ 3.5
6. ทำซ้ำข้อ 2 ถึง 5 เป็นระยะเวลา 1 เดือน
7. เมื่อครบกำหนด 1 เดือนนำแบตเตอรี่มาทำการทดสอบหาประสิทธิภาพหลังการเก็บรักษาตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ [31]

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 3.6 ขั้นตอนการทดสอบหลังการเก็บรักษาเพื่อทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง [30]

ลำดับ	ขั้นตอน
1	คายประจุ (0.4 A/10.5 V)
2	อัดประจุ (0.8 A/14.1 V/11 hr)
3	ทำซ้ำลำดับที่ 1 ถึง 2 เป็นจำนวน 5 ครั้ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ การศึกษาผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์เหลว การศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นโดยปราศจากสารเติมแต่งและผลของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิแอคริลาไมด์ พอลิพิร์โรล สารประกอบแอลดิไฮด์ และวานิลลิน ในแต่ละส่วนจะแบ่งการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ และในส่วนสุดท้ายเป็นผลการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลวและเจลอีกด้วย

4.1 การศึกษาผลของสารเติมแต่งซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์เหลว

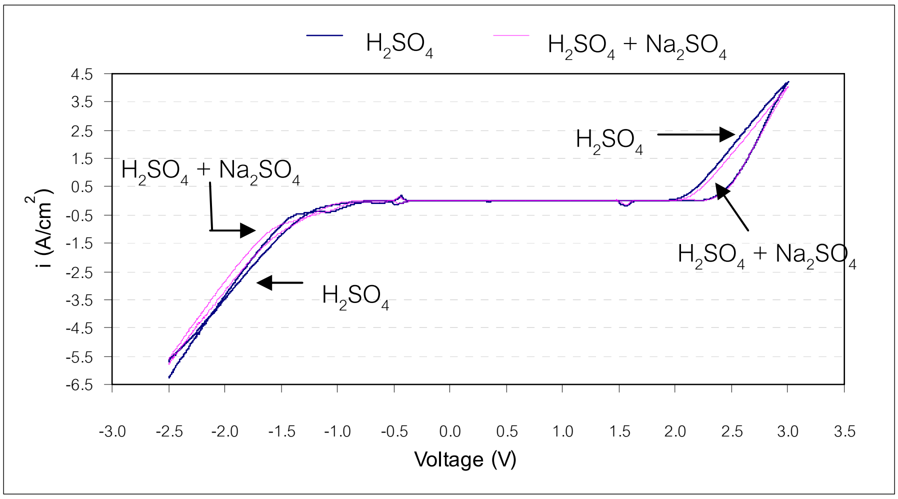
ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญต่อสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตเนื่องจากมีหลากหลายงานวิจัยทำการศึกษาสารเติมแต่งนี้และให้ผลการทดสอบต่างๆที่ดี โดยพบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตแบบผงลงในอิเล็กโทรไลต์ปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยป้องกันการใช้หมดไปของ SO_4^{2-} ซึ่งเป็นอันตรายเมื่อแบตเตอรี่จ่ายไฟโดยไม่มีกรด การใส่โซเดียมซัลเฟตเป็นการเสริม SO_4^{2-} โดยไม่ทำให้ตะแกรงกร่อน นอกจากนี้ยังพบว่าโซเดียมซัลเฟตช่วยเพิ่มความสามารถในการประจุไฟฟ้ากลับ [4, 22] การเติมใช้โซเดียมซัลเฟตเติมลงในแผ่นขั้วบวก เมื่อแผ่นขั้วสัมผัสกับอิเล็กโทร-ไลต์จะทำให้เกิดการละลายของโซเดียมซัลเฟตออกจากแผ่นธาตุ จึงส่งผลให้เพิ่มพื้นที่ผิวของแผ่นขั้วบวกให้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้แบตเตอรี่ทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น [5] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าการใช้โซเดียมซัลเฟตเติมลงในแผ่นขั้วลบปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของแผ่นขั้วลบสามารถช่วยเพิ่มความจุ การทำงานที่อุณหภูมิต่ำของแบตเตอรี่ดีขึ้นและอายุการใช้งานนานขึ้นเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีโซเดียมซัลเฟต [5]

จากการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในส่วนประกอบต่างๆของแบตเตอรี่ที่กล่าวข้างต้นส่งผลดีต่อแบตเตอรี่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตปริมาณ 13.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (1 %wt) ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับเติมลงในอิเล็กโทรไลต์ที่มีผู้วิจัยแล้วค้างต้น [4] เปรียบเทียบกับการไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตเท่านั้น เนื่องจากวิธีเป็นวิธีที่ง่ายต่อการปรับปรุงสมรรถนะของแบตเตอรี่มากที่สุด

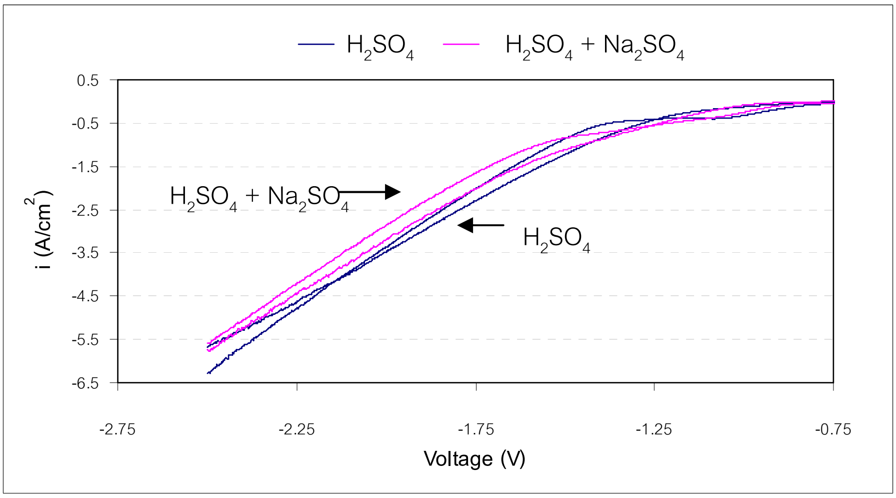
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

การทดสอบในส่วนนี้ทำเพื่อศึกษาปฏิกิริยาโดยรวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่และให้ความสำคัญกับการเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนหรือปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำนั้นเอง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญเกิดในขณะที่แบตเตอรี่อัดประจุไฟฟ้ามากเกินและเป็นสาเหตุทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลง โดยการศึกษาเปรียบเทียบอิเล็กโทรไลต์เหลว 2 ชนิด คือ อิเล็กโทรไลต์เหลวที่ไม่เติมโซเดียมซัลเฟตและเติมโซเดียมซัลเฟตปริมาณ 13.25 กรัมต่อลิตร จากผลการวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์เหลวด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก) พบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่พิจารณาได้จากช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของอิเล็กโทรไลต์เหลวที่ไม่เติมโซเดียมซัลเฟตและเติมโซเดียมซัลเฟตนั้นให้พีกของการเกิดปฏิกิริยาที่ตรงกันนั่นเอง นอกจากนั้นหากพิจารณาในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจน ที่ช่วงความต่างศักย์ -2.5 V ถึง -0.75 V และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนที่ช่วงความต่างศักย์ 1.75 V ถึง 3 V พบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนช้าขึ้นและลดอัตราการเกิดลงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.1 ข) และ ค) จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้ลดการสูญเสียน้ำของแบตเตอรี่ได้เล็กน้อย

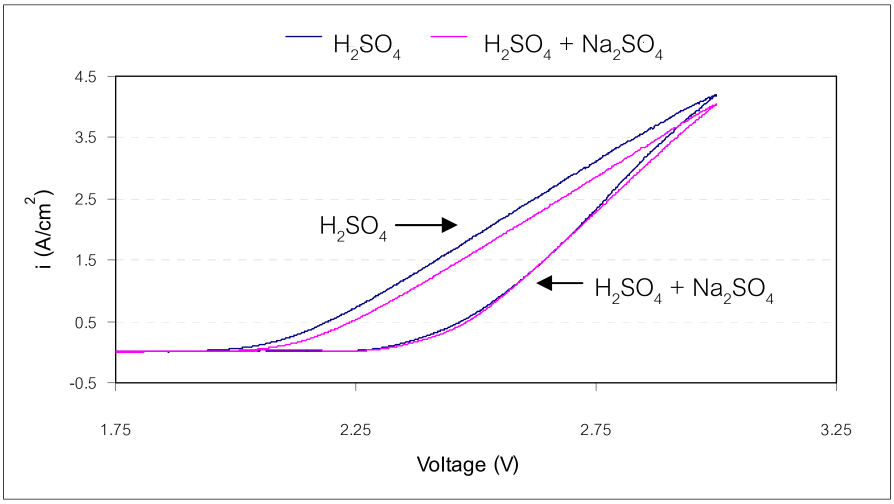
ก)



ข)



ค)

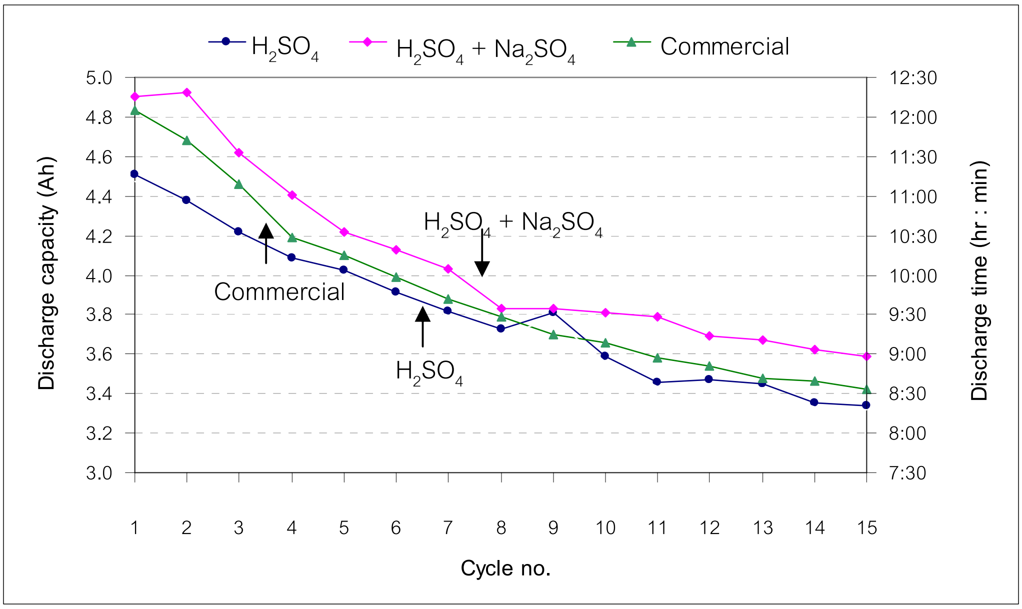


รูปที่ 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเปรียบเทียบกรดซัลฟูริกที่ไม่เติมและเติมโซเดียมซัลเฟตช่วง ก) -2.5 V ถึง 3.0 V ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

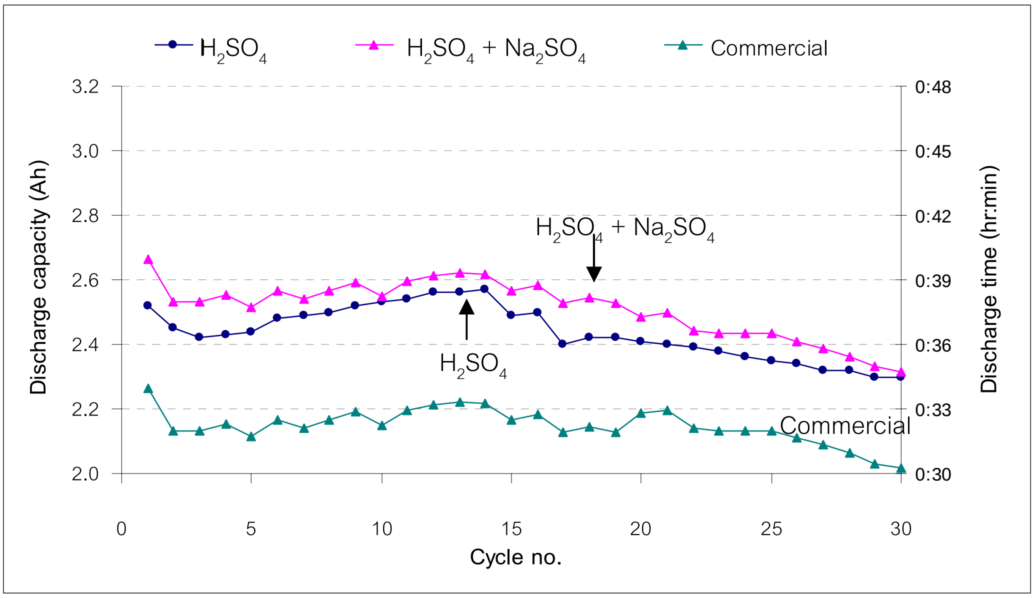
4.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

ผลการทดสอบหาค่าความความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวที่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่ใช้ในการค้าแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวทั้ง 3 ให้ค่าความจุในการคายจุของแบตเตอรี่ลดลงเมื่อจำนวนรอบการทดสอบของแบตเตอรี่เพิ่มมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากความเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่เมื่อใช้งานมากขึ้น แบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าให้ค่าความจุการคายประจุของแบตเตอรี่มากกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ทดลองที่ไม่มีสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตเมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (4.2 ก)) และให้ค่าความจุของแบตเตอรี่น้อยกว่าเมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง(4.2 ข)) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าอาจมีการเติมสารเติมแต่งบางชนิดลงในอิเล็กโทรไลต์ แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาแบตเตอรี่ที่ใช้ทดลองที่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต พบว่าให้ค่าความจุการคายประจุเฉลี่ยที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าและแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต โดยให้ค่าความจุเฉลี่ยมากขึ้นร้อยละ 6.85 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.35 เมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และให้ค่าความจุเฉลี่ยมากขึ้นร้อยละ 3.29 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.55 เมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) เทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เนื่องมาจากการการทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่การคายประจุจนหมด ดังนั้นการเติมโซเดียมซัลเฟตจะช่วยป้องกันการใช้หมดไปของ SO_4^{2-} เมื่อมีการคายประจุเป็นจำนวนมาก และช่วยทำให้การอัดประจุย้อนกลับดีขึ้น [4, 5] ดังนั้นการคายประจุในรอบถัดไปจึงสามารถทำงานได้ดีกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตนั้นเอง อีกทั้งการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์เป็นการเพิ่มไอออนให้กับระบบอาจทำให้ค่าการนำโปตรอนดีขึ้น จึงส่งผลให้ลดค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ภายในแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นดังพิจารณาได้จากสมการที่ 2.1 ดังนั้นจึงส่งผลให้แบตเตอรี่ที่มีการเติมสารโซเดียมซัลเฟตให้ค่าความจุในการคายประจุได้มากขึ้นและมีประสิทธิภาพดีกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซลเฟต จึงกล่าวได้ว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตที่ปริมาณ 13.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ช่วยเพิ่มสมรรถนะของแบตเตอรี่ให้สูงขึ้น

ก)



ข)



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต แบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร และแบตเตอรี่ที่ใช้ในการค้า ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง

4.2 ผลการศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นโดยปราศจากสารเติมแต่งและผลของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์

เนื่องจากการเติมโซเดียมซัลเฟตให้ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ดีขึ้นดังกล่าวข้างต้น ในส่วนของการศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์จึงมีการนำสารโซเดียมซัลเฟตมาเป็นสารเติมแต่งในทุกสูตร

4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์

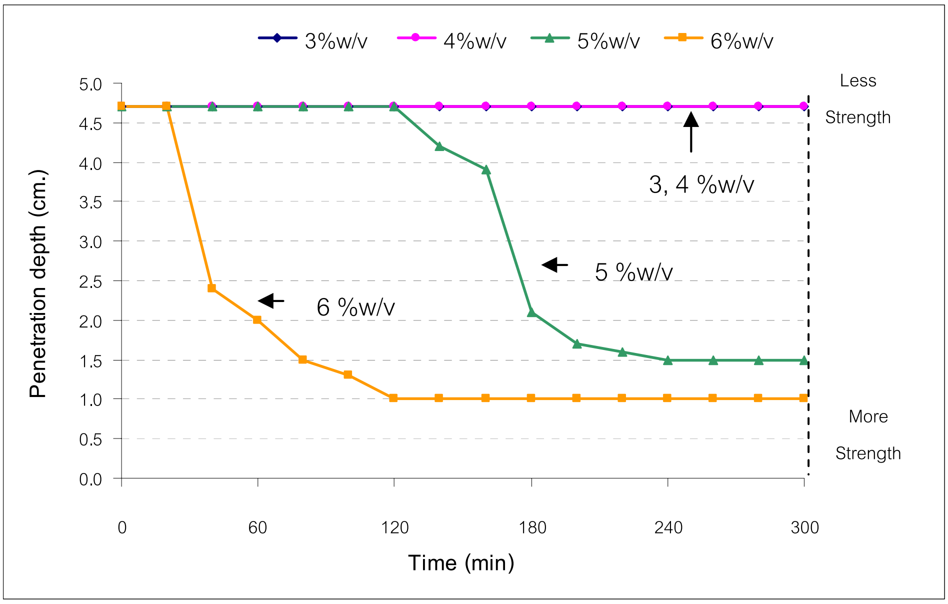
4.2.1.1 ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล

เวลาในการเกิดเจลมีความสำคัญต่อกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่ กล่าวคือ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติแบบไทโซโทรปี (thixotropy) เจลจะมีความหนืดและความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีแรงกระทำต่อเจล แต่จะกลับมาเหลวอีกครั้งเมื่อมีแรงมากระทำกับเนื้อเจล [12, 20] หากเจลอิเล็กโทรไลต์มีระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้นจะส่งผลให้กระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่นั้นทำได้ยาก เนื่องจากเนื้อเจลจะมีความหนืดมาก มีการแข็งตัวก่อนที่จะเติมลงในแบตเตอรี่ได้หมด ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเซลล์แบตเตอรี่ขึ้นทำให้ลดสมรรถนะของแบตเตอรี่ลง แต่ในทางกลับกันหากเจลที่เตรียมได้มีระยะเวลาในการเกิดเจลที่นานมากหรือความแข็งของเจลต่ำ ถึงแม้ว่าจะง่ายต่อการเติมลงแบตเตอรี่ แต่จะส่งให้เจลแบตเตอรี่ที่ได้ยังคงมีน้ำกรดรั่วซึมอยู่ มีรายงานว่าระยะเวลาในการเกิดในช่วง 3 – 4 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาในการเกิดเจลที่เหมาะสมสำหรับเจลแบตเตอรี่ [27] ในงานวิจัยนี้จะแบ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในเกิดเจลเป็น 2 ปัจจัย คือ ผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจลและผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งทีมีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล สำหรับสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่นำมาพิจารณา

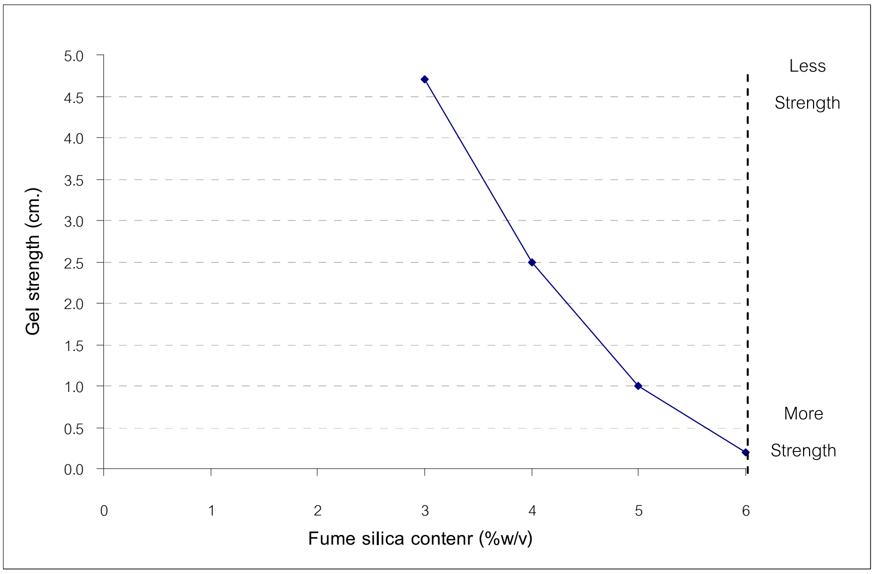
1. ผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

จากผลการทดสอบปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจลแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณฟูมซิลิกาที่ใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล (gelling agent) ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล โดยเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3 และ 4 %w/v ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลมากกว่า 5 ชั่วโมง ในขณะที่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 และ 6 %w/v ให้ระยะเวลา

ในการเกิดเจลประมาณ 3 ชั่วโมง 20 นาที และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณของฟูมซิลิกามาก จะส่งผลให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วลดลงเร็วขึ้น เนื่องจากฟูมซิลิกาปริมาณมากจะทำให้การสร้างเจลในขั้นการสร้างพันธะไซโลเซนมีโอกาสการเกิดได้มากกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณของฟูมซิลิกาน้อย นอกจากนี้ปริมาณฟูมิซิลิกายังส่งผลต่อความแข็งของเจล โดยการเพิ่มปริมาณฟูมซิลิกาจะส่งผลให้เจลมีความแข็งมากขึ้น ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงระยะทางที่ลูกตะกั่วเคลื่อนที่ได้หลังทิ้งเจลอิเล็โทรไลต์ไว้เป็นระยะ 1 วัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเจลที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกามากจะให้โครงสร้างของเจลจับตัวอย่างหนาแน่น มีความพรุนของเจลต่ำ (gel porosity) ในขณะที่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟูมซิลิกาน้อย จะให้โครงสร้างที่มีการจับตัวกันอย่างหลวมๆ มีความพรุนสูง ดังนั้นเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟูมซิลิกามากจึงทำให้เจลมีความแข็งมากตามเช่นกัน [20]



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกาต่างๆ

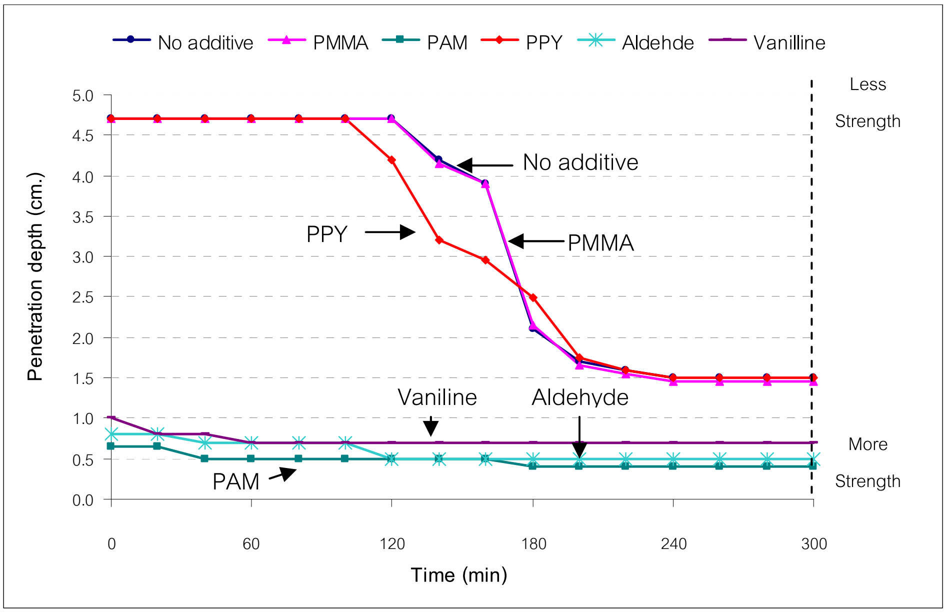


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลที่ปริมาณฟูมซิลิกาต่างๆ

2. ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

2.1 ผลของชนิดสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

ในส่วนนี้จะให้ความสำคัญต่อชนิดของสารเติมแต่ง เพื่อใช้ในการหาแนวโน้มชนิดและปริมาณการเติมสารเติมแต่งที่เหมาะสมในส่วนที่ 2.2 ดังนั้นจึงเลือกศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v เพราะให้ระยะเวลาในการเกิดเจลภายใน 5 ชั่วโมง ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลง และสารเติมแต่งที่ความเข้มข้น 0.5 %w/v ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่ค่อนข้างมากสำหรับการเติมสารเติมแต่งและคาดว่าจะสามารถเห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากชนิดของสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการเกิดเจลได้ชัดเจน สำหรับสารเติมแต่งต่างๆ ที่ในการทดลอง ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิแอคริลาไมด์ พอลิพิร์โรล สารประกอบแอลดิไฮด์ และวานิลลิน ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.5 พบว่าสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลและพอลิพิร์โรลส่งผลต่อความแข็งของเจลเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามยังคงให้ค่าระยะเวลาในการเกิดในช่วง 3 ชั่วโมงเช่นเดิม ในขณะที่สารประกอบแอลดิไฮด์ วานิลลิน และ พอลิแอคริลาไมด์ ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล โดยทำให้เจลแข็งตัวเร็วขึ้นและมีความแข็งตัวเพิ่มขึ้นมาก



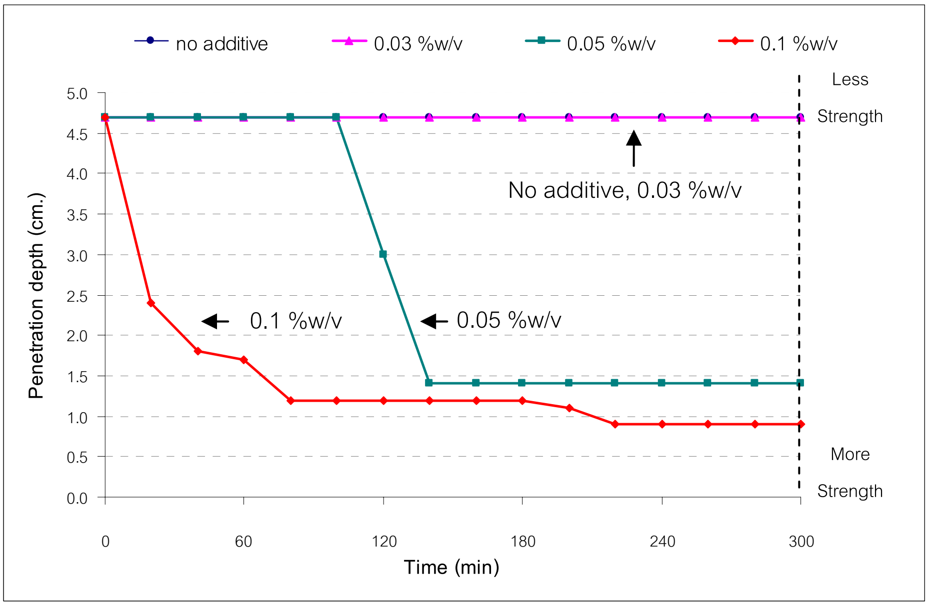
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกา 5 %w/v สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ 0.5 %w/v

2.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

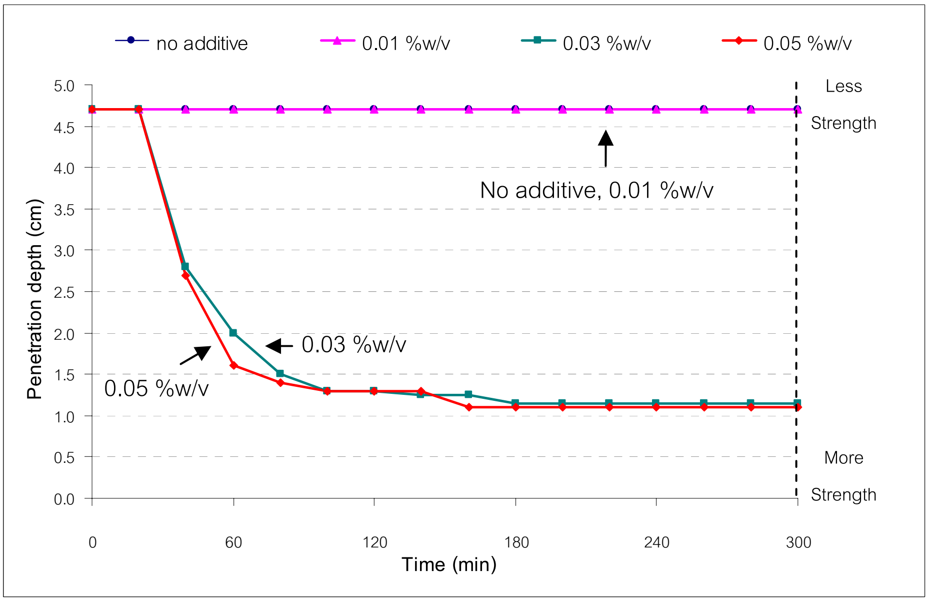
จากผลการทดสอบในข้อ 2.1 พบว่ามีเพียง สารประกอบแอลดิไฮด์ วานิลลิน และพอลิแอคริลาไมด์ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล ดังนั้นในส่วนนี้จะพิจารณาเพียงสาร 3 ชนิดนี้เท่านั้น

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเติมแต่งวานิลลินและสารประกอบแอลดิไฮด์ต่างๆ ที่ปริมาณซิลิกา 4%w/v ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ก) และ 4.6 ข) ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดเพิ่มมากขึ้นระยะเวลาในการเกิดเจลจะสั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้เจลมีความแข็งตัวเพิ่มมากขึ้นและสารประกอบแอลดิไฮด์จะให้ความแข็งเจลมากกว่าสารเติมแต่งวานิลลินดังแสดงในรูปที่ 4.7

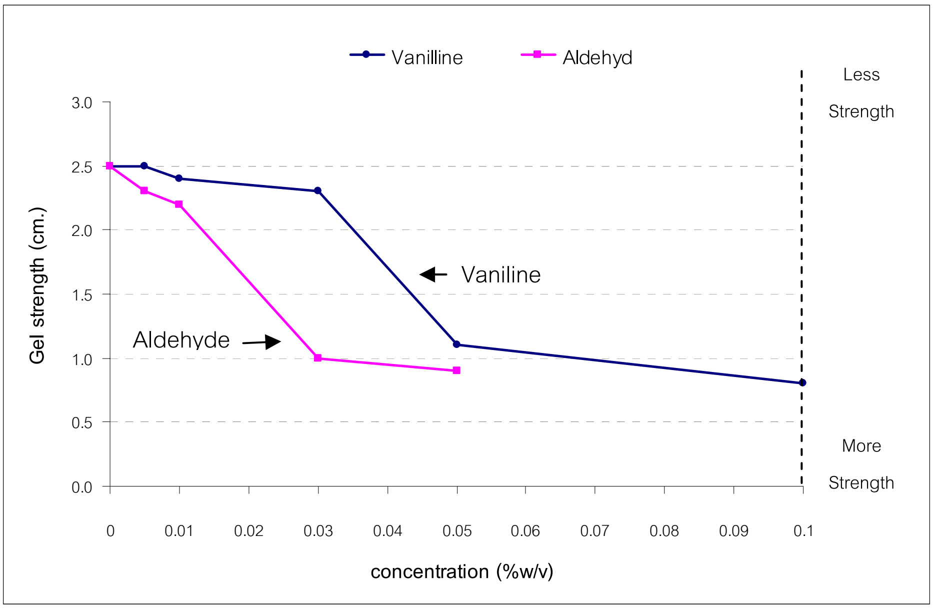
ก)



ข)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ที่ปริมาณสารเติมแต่งต่างๆ ก) วานิลลิน ข) สารประกอบแอลดิไฮด์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลของสารเติมแต่ง วานิลินและสารประกอบแอลดิไฮด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

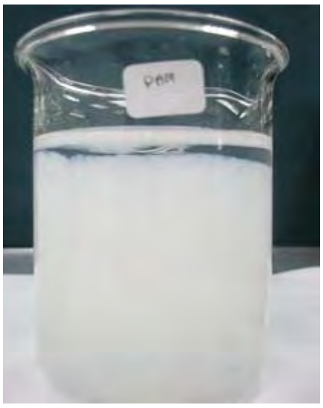
ในส่วนของสารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์ พบว่าจะมีตะกอนเกิดขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งมากกว่าหรือเท่ากับ 0.03 %w/v ลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมิซิลิกา 3 %w/v ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และสารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์จะให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้นมาก ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการสร้างพันธะของหมู่ไนโตรเจนในพอลิแอคริลาไมด์กับอนุภาคซิลิกา [29] นั้นดังคาดว่าการเติมพอลิแอคริลาไมด์ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสัดส่วนของปริมาณฟูมซิลิกาส่งผลเพียงลดระยะเวลาในการเกิดเจลลดลง ในขณะที่เมื่อเติมพอลิแอคริลาไมด์ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนของปริมาณฟูมซิลิกาคาดว่าการสร้างพันธะของของหมู่ไนโตรเจนในพอลิแอคริลาไมด์กับอนุภาคซิลิกาจะเกิดได้มาก ในขณะที่การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกรดกับอนุภาคซิลิกาในช่วงการสร้างเจลเกิดได้น้อยลง จึงส่งผลทำให้เกิดเป็นตะกอนแทนการเกิดเป็นเนื้อเจลนั่นเอง สรุปผลการทดสอบหาระยะเวลาของสารเติมแต่งในการเกิดเจลที่ปริมาณต่างๆของสารประกอบแอลดิไฮด์ วานิลลิน และ พอลิแอคริลาไมด์ กับปริมาณฟูมซิลิกาที่ 3, 4 และ 5 %w/v แสดงดังตารางที่ 4.1

ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลมากกว่า 3 ชั่วโมง เนื่องจากในช่วงระยะเวลาในการเกิดเจลนี้ เนื้อเจลที่ได้จะไม่หนืดมากนัก สามารถเติมเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ได้ดีซึ่งจะได้กล่าวในส่วนของการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ถัดไป ดังนั้นปริมาณฟูมซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์สูงสุดที่ 5 %w/v สำหรับปริมาณของสารเติมแต่งพอลิพิร์โรลและพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถเติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ได้ทุก

ความเข้มข้น เนื่องจากไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล ในส่วนของสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ วานิลลิน และ พอลิแอคริลาไมด์ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลที่แสดงดังตารางที่ 4.1 ส่วนสภาวะที่แรงเงาคือสูตรเจลที่สามารถเติมลงในอิเล็กโทรไลต์ได้

ก)

ข)



รูปที่ 4.8 เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3 %w/v สารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์ 0.03 %w/v ก) ด้านบน ข) ด้านข้าง

ตารางที่ 4.1 สรุประยะเวลา (ชั่วโมง:นาที) ในการเกิดเจลที่ปริมาณฟูมซิลิกาและสารเติมแต่งต่างๆ

Name	Fume silica (%w/v)	Additives (%w/v)						
		0	0.005	0.01	0.03	0.05	0.1	0.5
Vanilline	3	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	4	>5	>5	>5	>5	2:20	1:20	-
	5	3:20	3	-	-	-	-	G
Aldehyde	3	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	4	>5	>5	>5	1:40	1:20	-	-
	5	3:20	2:20	-	-	-	-	G
PAM	3	>5	>5	2	P	P	P	P
	4	>5	1	G	G	-	-	-
	5	3:20	G	-	-	-	-	G

"G" refers to gel-form electrolyte and "P" refers to precipitation

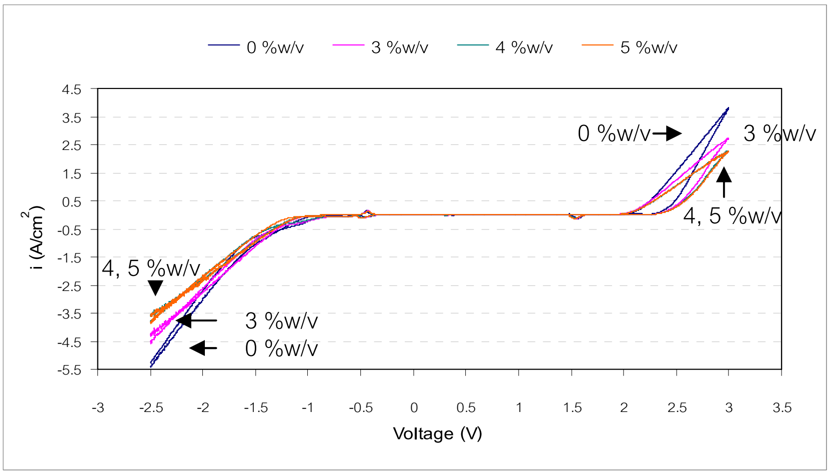
4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรี

จากผลการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.2.1.1 แล้วนั้น ทำการเลือกเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ค่าระยะเวลาในการเกิดเจลมากกว่าเท่ากับ 3 ชั่วโมงมาวิเคราะห์การสูญเสียน้ำภายในแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรี

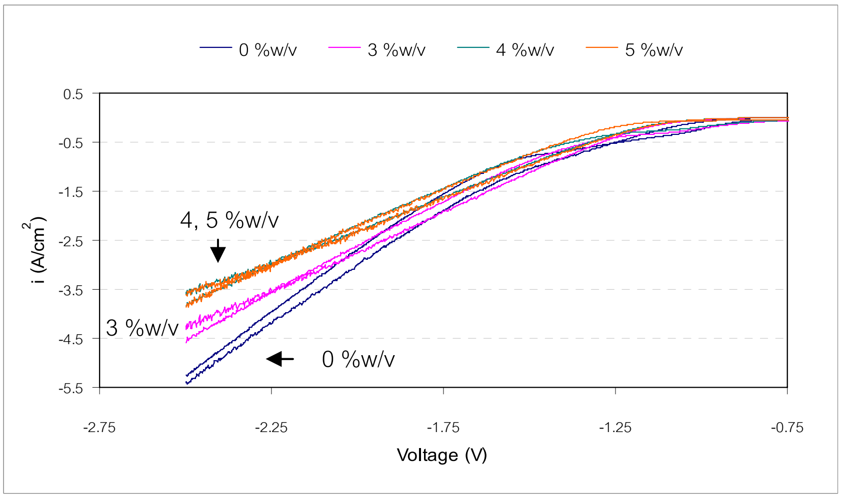
1. ผลของปริมาณฟูมซิลิกา

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรีเปรียบเทียบอิเล็กโทรไลต์เหลว (0%w/v) และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่างกัน พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่พิจารณาได้จากช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของอิเล็กโทรไลต์เหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์นั้นให้พีกของการเกิดปฏิกิริยาที่ตรงกันนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 4.9 ก) โดยหากพิจารณาในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจน ที่ช่วงความต่างศักย์ -2.5 V ถึง -0.75 V และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนที่ช่วงความต่างศักย์ 1.75 V ถึง 3 V พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 4.9 ข) และ ค) โดยปริมาณฟูมิซิลิกามากขึ้นจะช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนให้ลดลงพิจารณาปริมาณฟูมซิลิกา 0, 3 และ 4 %w/v แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณถึงปริมาณหนึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนคงที่พิจารณาได้จากปริมาณฟูมซิลิกาที่ 4 และ 5 %w/v ซึ่งจะให้อัตราปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่ากัน จึงอาจกล่าวได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดการสูญเสียน้ำของแบตเตอรี่

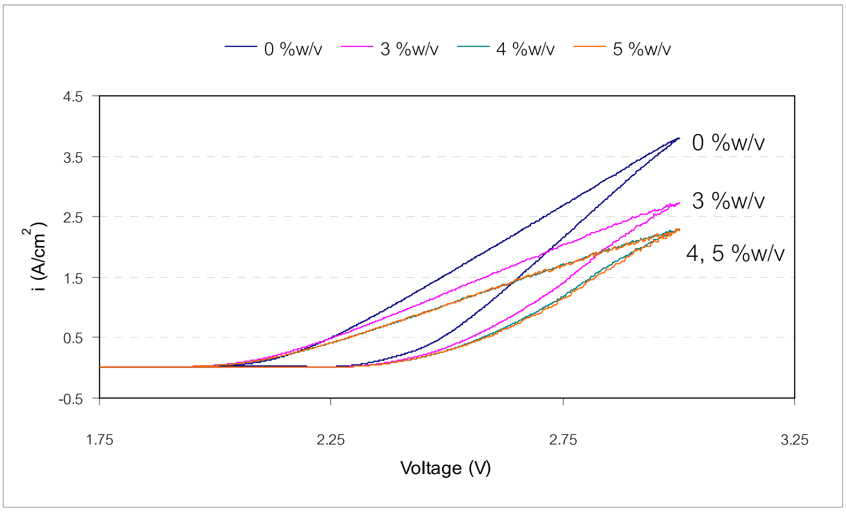
ก)



ข)



ค)

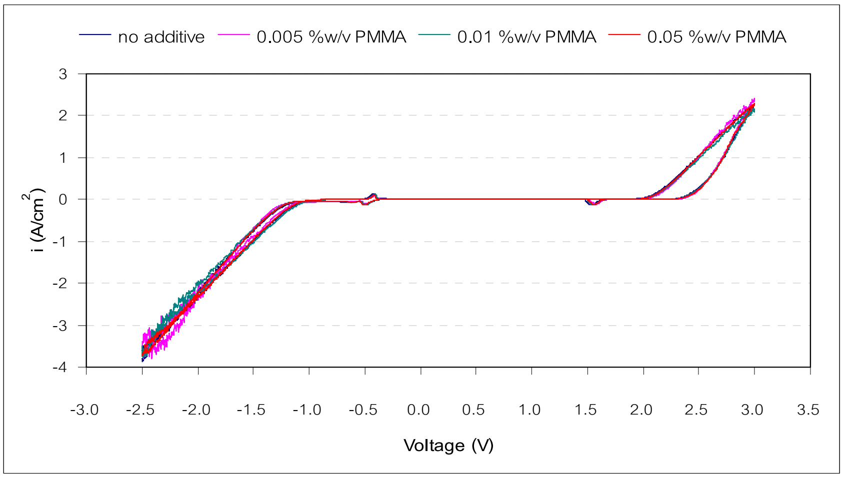


รูปที่ 4.9 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ก) เปรียบเทียบปริมาณฟูมซิลิกาต่างๆช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

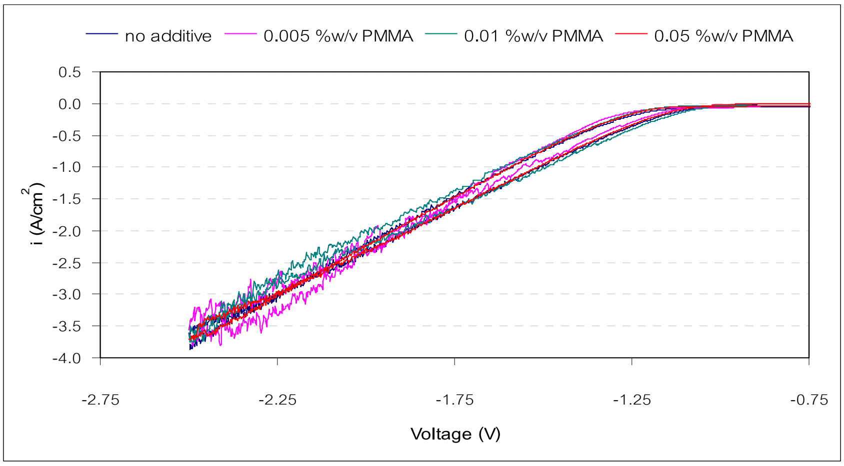
2. ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรีเปรียบเทียบเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งต่างๆ ประกอบด้วยสารประกอบแอลดิไฮด์ วานิลลิน พอลิเมทิลเมทาคริเลต และพอลิพิร์โรล พบว่าสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ดังรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 เมื่อพิจารณาในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่งและเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งชนิดและปริมาณต่างๆ นั้นให้พีกของการเกิดปฏิกิริยาที่ตรงกันและไม่มีพีกอื่นในช่วงความต่างศักย์ดังกล่าว ในส่วนของสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ พอลิพิร์โรล นอกจากจะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่แล้ว ยังไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ พอลิพิร์โรลตามลำดับ ในขณะที่สารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์และวานิลลินส่งผลต่อการเกิดปฏิกิราไฮโดรเจนและออกซิเจนพิจารณาได้จากในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจน ที่ช่วงความต่างศักย์ -2.5 V ถึง -0.75 V และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนที่ช่วงความต่างศักย์ 1.75 V ถึง 3 V พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมจากสารเติมแต่งทั้งสองช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 4.12, 4.13 ข) และ ค) ของสารประกอบแอลดิไฮด์และวานิลลินตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งทั้งสองมากขึ้นจะช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนให้ลดลงที่จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์และวานิลลินลงในเจลอิเล็กโทรไลต์จะช่วยลดการสูญเสียน้ำของแบตเตอรี่มากขึ้น

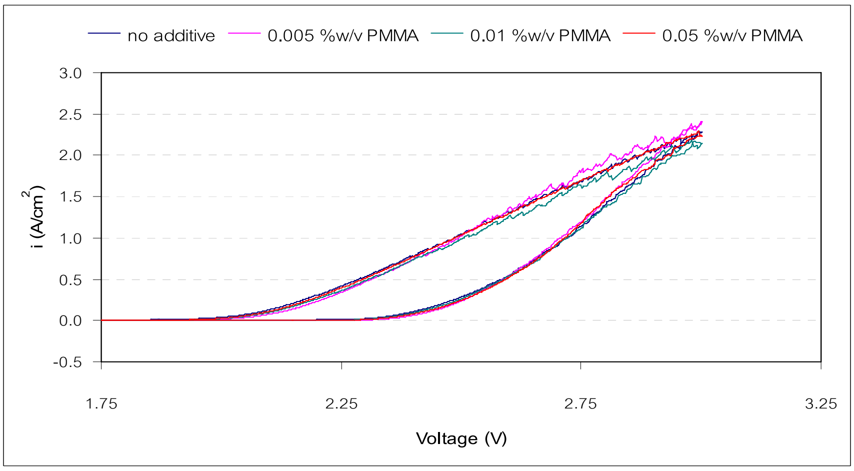
ก)



ข)

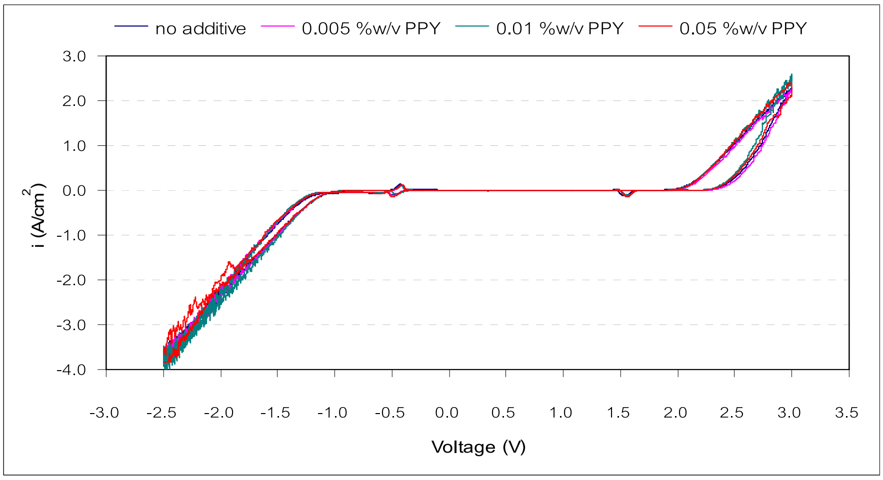


ค)

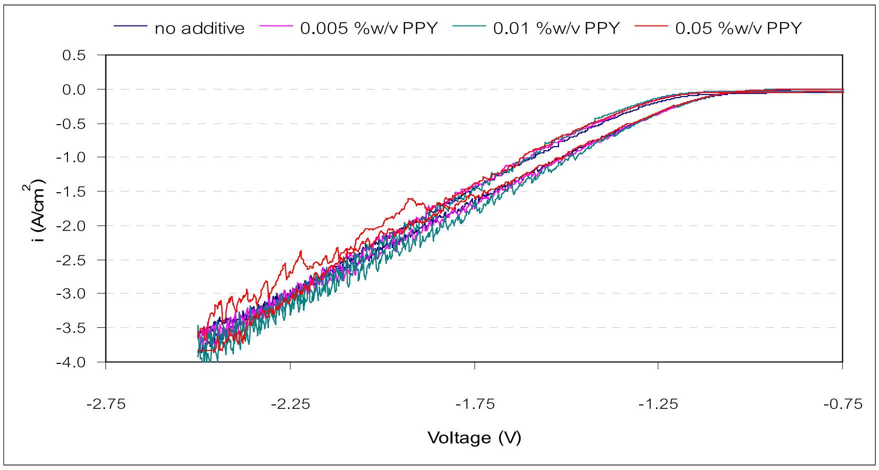


รูปที่ 4.10 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต ต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

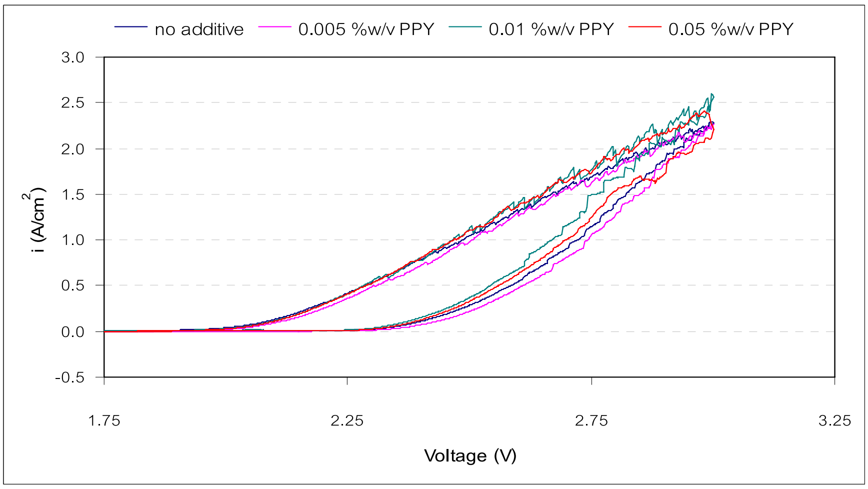
ก)



ข)

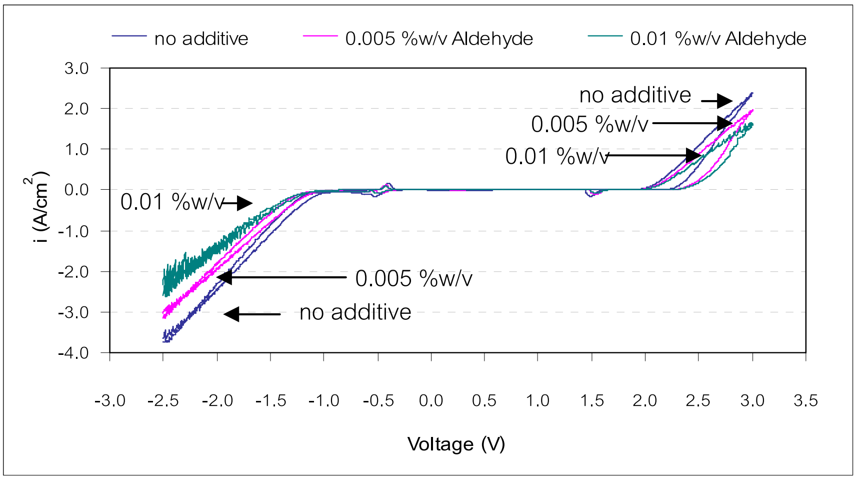


ค)

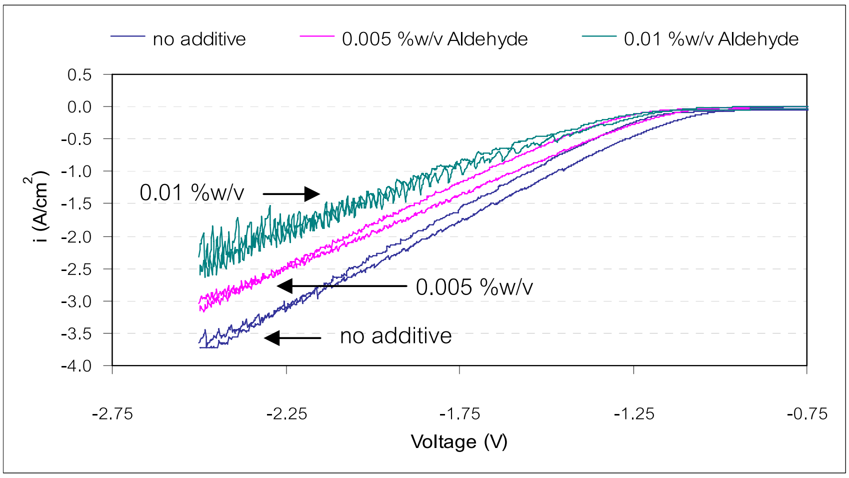


รูปที่ 4.11 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณพอลิพิร์โรลต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

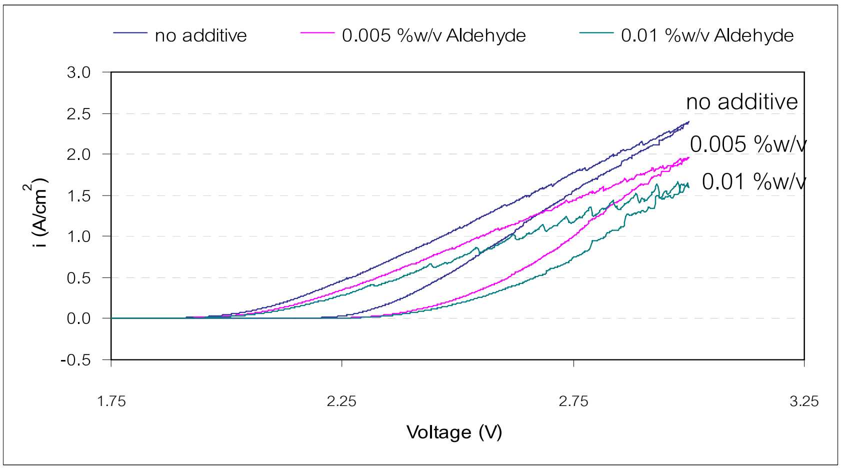
ก)



ข)

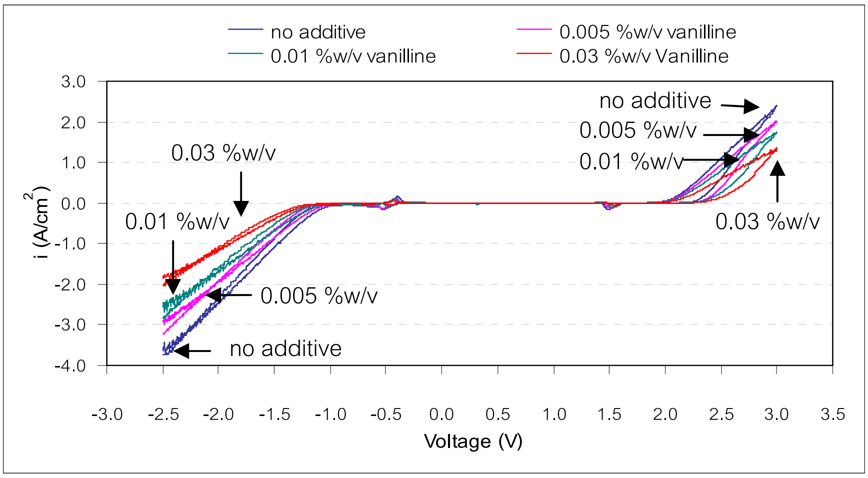


ค)

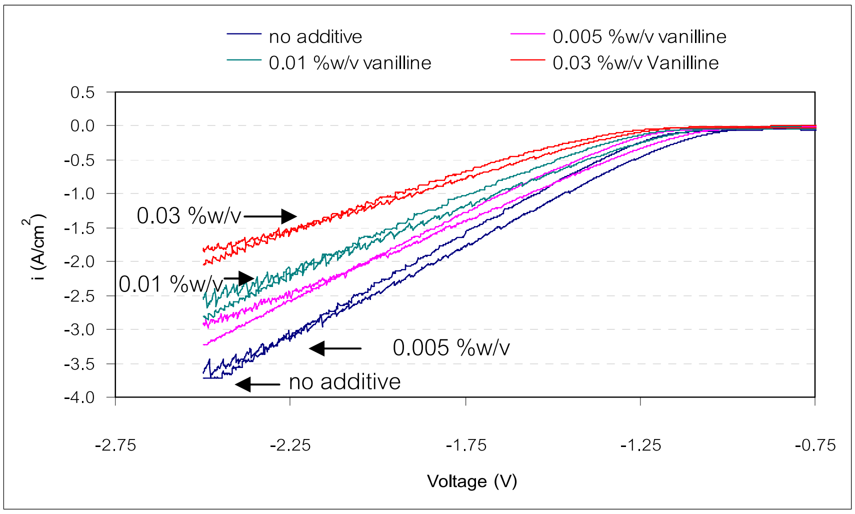


รูปที่ 4.12 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อมีการเติมสารประกอบแอลดิไฮด์ปริมาณต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

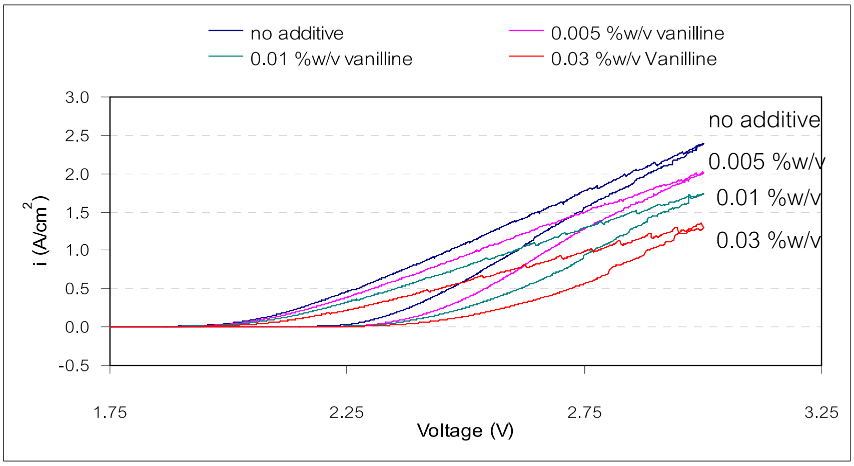
ก)



ข)



ค)

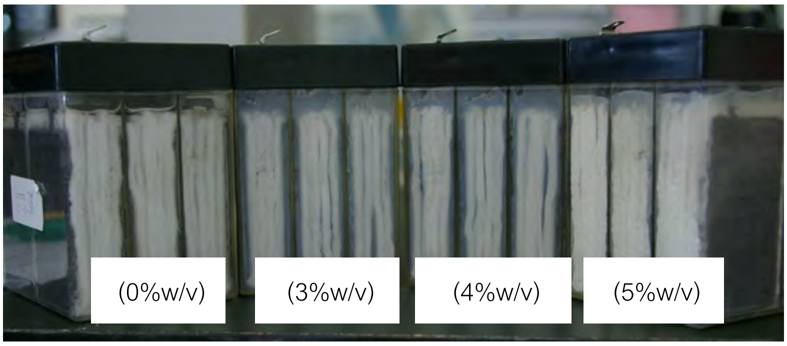


รูปที่ 4.13 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อมีการเติมวานิลินปริมาณต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

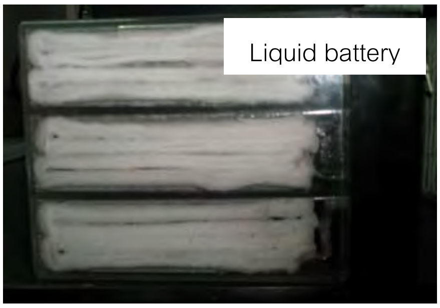
4.2.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

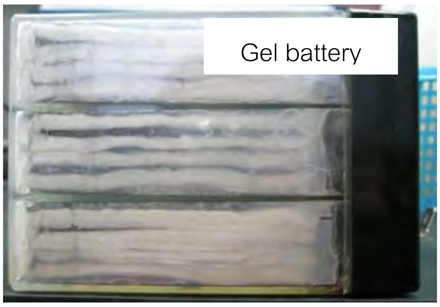
ในส่วนการทดสอบแบตเตอรี่ ปกติใช้แบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบมีขนาดความจุประจุ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ 6 ช่อง และ ใช้แบตเตอรี่ที่ขนาดความจุประจุ 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ 6 ช่อง ในการเปรียบเทียบสมรรถนะกับแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้า อิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาวะของเหลวและเจลจะเติมลงในแบตเตอรี่ด้วยเครื่องเติมน้ำกรดสูญญากาศ ในขั้นตอนการเติมอิเล็ก-โทรไลต์ลงในแบตเตอรี่พบว่าอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาวะของเหลวจะเติมได้ง่ายกว่าและ ใช้เวลาในการเติมสั้นกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณมากจะใช้ระยะเวลาในการเติมมากขึ้น และเมื่อสังเกตคุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่หลังการเติมอิเล็กโทรไลต์เรียบร้อยแล้ว พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เจลจะมีช่องว่างภายในแบตเตอรี่มากกว่าในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว และเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3 %w/v ขึ้นไปจะให้เนื้อเจลที่แข็งไม่มีส่วนของน้ำกรดเหลืออยู่ด้านบนดังแสดงในรูปที่ 4.14 ก) และเมื่อวางแบตเตอรี่แนวนอนดังแสดงในรูปที่ 4.14 ข) พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นไม่มีการไหลของอิเล็ก-โทรไลต์ จึงกล่าวได้ว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นช่วยลดการรั่วซึมของน้ำกรด

ก)



ข)

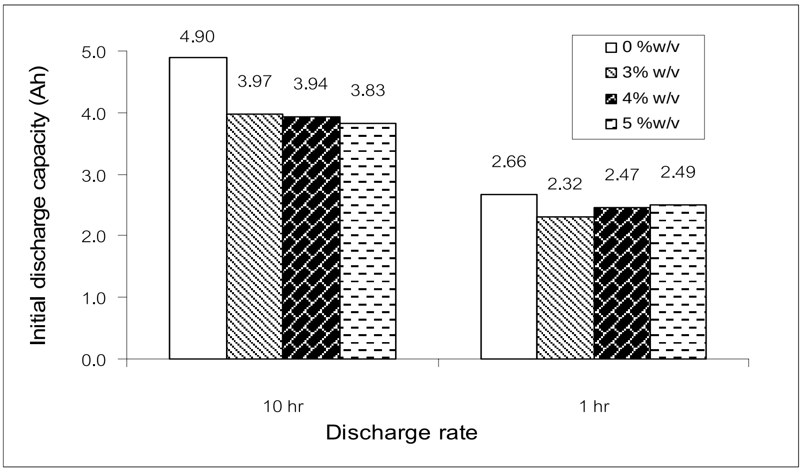




รูปที่ 4.14 คุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็โทรไลต์เหลวกับเจลที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ ก) วางแนวตั้ง ข) วางแนวนอน

4.2.2.1 ผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่

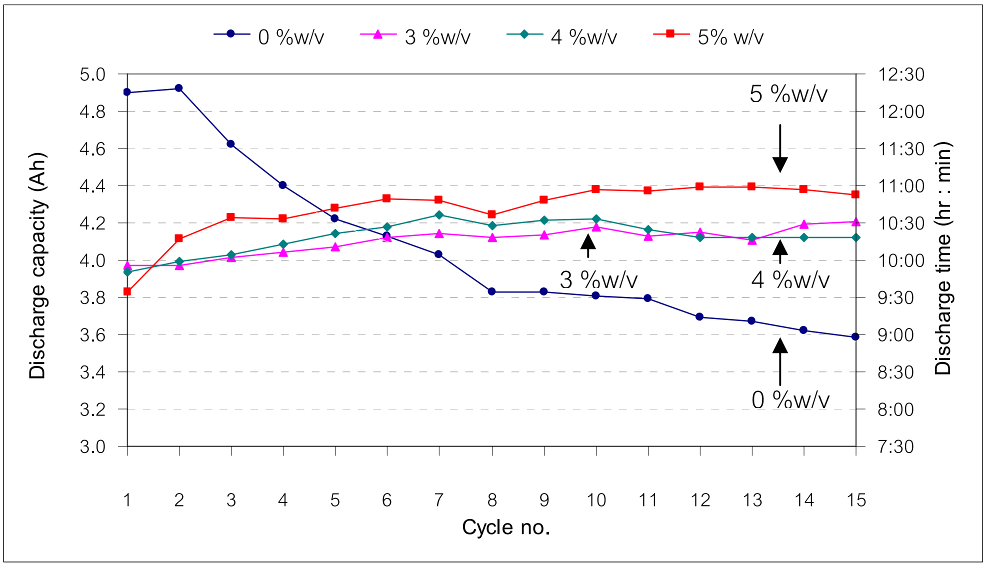
จากผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเจลจะให้ค่าการคายประจุเริ่มต้นที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากระหว่างการเติมอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตแตอรี่ แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเจลจะมีความหนืดมากกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาวะของเหลวมาก ดังนั้นจึงส่งผลให้การกระจายตัวของเจลอิเล็กโทรไลต์ภายในแบตเตอรี่ไม่ดีเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลว สังเกตุได้จากคุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่ เมื่อเติมเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่จะพบว่ามีช่องว่าง มากกว่าในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวที่กล่าวแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงส่งผลต่อทำให้การถ่ายโอนประจุในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการคายประจุซึ่งทำได้ยากกว่า ค่าการคายประจุเริ่มต้นของเจลแบตเตอรี่จึงน้อยกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราเร็วการคายประจุ (1 ชั่วโมง) จะพบว่าความแตกต่างของค่าความจุในการคายประจุเริ่มต้นจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ข) เนื่องจากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติไทโซโทรปีจะอ่อนตัวเมื่อมีแรงมากระทำ การอัดและคายประจุของแบตเตอรี่เป็นการให้แรงกับเจล ดังนั้นที่อัตราการคายประจุที่สูงจะส่งผลให้เจลเกิดการอ่อนตัวมากกว่าการคายประจุที่ต่ำ จึงช่วยลดช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ ส่งผลให้ค่าความจุเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับปริมาณฟูมซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ส่งผลแบบไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่



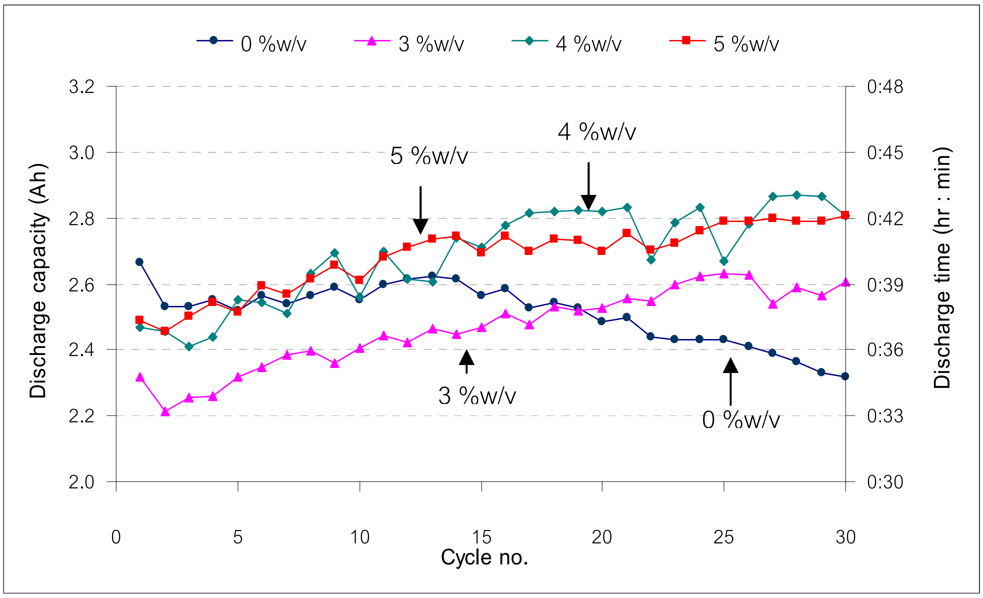
รูปที่ 4.15 ค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นที่อัตราเร็วในการคายประจุ 10 และ 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ปริมาณฟูซิลิกาต่าง ๆ

นอกจากนี้ผลการทดสอบสมรรถนะความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ก) และ ข) ตามลำดับ พบว่าถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวจะให้ค่าความจุในการคายประจุช่วงเริ่มต้นที่มากกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเจล แต่เมื่อจำนวนรอบการทดสอบแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น สมรรถนะของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวกลับให้ค่าความจุลดลงในขณะที่แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเจลมีแน้วโน้มให้ค่าความจุในการคายประจุที่เพิ่มขึ้น เหตุผลหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวมีสมรรถนะที่ลดลงในขณะที่แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเจลยังคงให้ค่าเพิ่มขึ้นนั้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟ้ฟ้าที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์เหลวจะเกิดการกัดกร่อนได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่มีสภาวะเจล และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเจลให้ค่าความจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเกิดการรวมกันเป็นเนื้อเดียวของเจลอิเล็กโทรไลต์มากขึ้นและช่วยลดช่องว่างภายในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นระหว่างการเติมอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีการอัด/คายประจุอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ระยะเวลาในการเสื่อมสมรรถนะของเจลแบตเตอรี่ช้ากว่า ซึ่งจำนวนรอบที่ใช้ในการทดลองนี้ยังไม่เห็นการเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่ จากผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (4.16 ก)) เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากฟูมซิลิกา 5 %w/v จะให้แนวโน้มค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่สูงที่สุด ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากฟูมซิลิกา 4 %w/v และ 3 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน และจากผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุสูง (4.16 ข)) เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากฟูมซิลิกา 5 และ 4 %w/v จะให้แนวโน้มค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มมากกว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมที่ขึ้นจากฟูมซิลิกา 3 %w/v สำหรับแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 6 %w/v พบว่าให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ต่ำมากแสดงดังตารางที่ ข.2 เนื่องจากในเจลองค์ประกอบนี้ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้น (น้อยกว่า 3 ชั่วโมง) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ส่งผลให้มีความหนืดมากทำให้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมลงในแบตเตอรี่ได้มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณความจุจริงของแบตเตอรี่และเนื้อเจลกระจายตัวได้ไม่ดีเกิดช่องว่างภายในแบตเตอรี่เป็นจำนวนมากนั่นเอง และแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 2 %w/v พบว่ายังคงมีการแยกชั้นน้ำกับเจลและมีรั่วของน้ำกรดระหว่างการอัดประจุ จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำมาพิจารณา

ก)



ข)



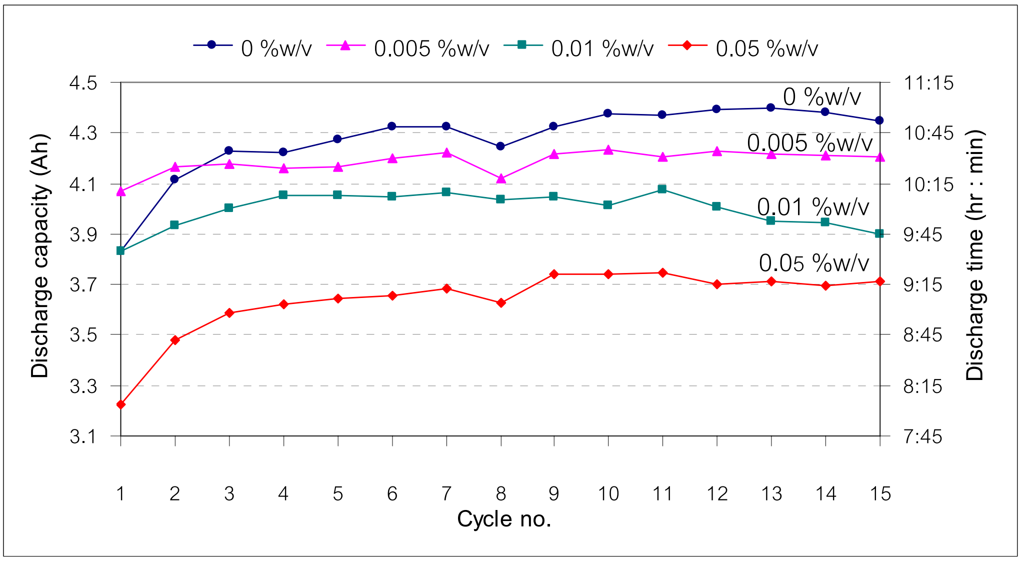
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง

4.2.2.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่

สำหรับในส่วนนี้สารเติมแต่งที่นำมาทดสอบ คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิพิร-โรล สารประกอบแอลดิไฮด์ และวานิลลิน สำหรับสารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์พบว่าเกิดการตกตะกอนดังแสดงในส่วนของการทดสอบเจลอิเล็กโทรไลต์ข้างต้น ถึงแม้ว่านำสูตรเจลอิเล็กโทร-ไลต์ที่เติมสารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์ที่ทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลแล้วไม่เกิดการตกตะกอนแล้วก็ตาม แต่เมื่อมีการขยายขนาดการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับการเติมลงในแบตเตอรี่ พบว่าเกิดการตกตะกอนขึ้นซึ่งอาจเป็นผลนื่องมาจากความแรงในการกวนไม่เพียงพอที่จะทำให้ฟูมซิลิกามีการแตกตัวมากพอที่จะจับหรือสร้างพันธะพร้อมกันกับกรดซัลฟิวริกและพอลิแอคริลาไมด์จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนคล้ายกับการเติมอัตราส่วนพอลิแอคริลาไมด์ที่มากเกินที่กล่าวแล้วข้างต้น ตะกอนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการอุดตันภายในเครื่องเติมน้ำกรด ดังนั้นสารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งภายในเจลแบตเตอรี่ โดยการทดสอบจะใช้การทดสอบสมรรถนะในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เป็นการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีการเติมสารเติมแต่งและให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง จึงคัดเลือกสภาวะที่ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ดีมาทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) ต่อไป

1. ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต

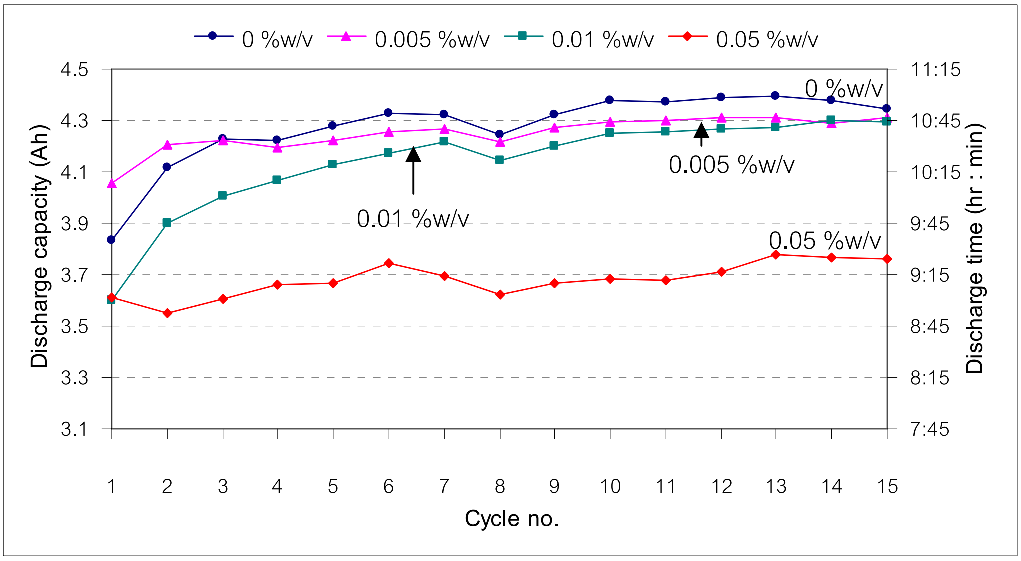
รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005, 0.01 และ 0.05 %w/v เลือกใช้ปริมาณฟูมซิลิกาที่ 5 %w/v ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีที่สุดและไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลดังกล่าวข้างต้น จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ พบว่าสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่งผลให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งในทุกๆความเข้มข้นที่ศึกษา โดยจะมีค่าความจุในการคายประจุต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 4.17 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 5 %w/v

2. ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งพอลิพิร์โรล

รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งพอลิพิร์โรลที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005, 0.01 และ 0.05 %w/v เลือกใช้ปริมาณฟูมซิลิกาที่ 5 %w/v ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีที่สุดและไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลดังกล่าวข้างต้นเช่นเดียวกับสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ พบว่าสารเติมแต่งพอลิพิร์โรลส่งผลให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ ที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งในทุกๆความเข้มข้นที่ศึกษาและมีค่าความจุในการคายประจุต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งพอลิพิร์โรล



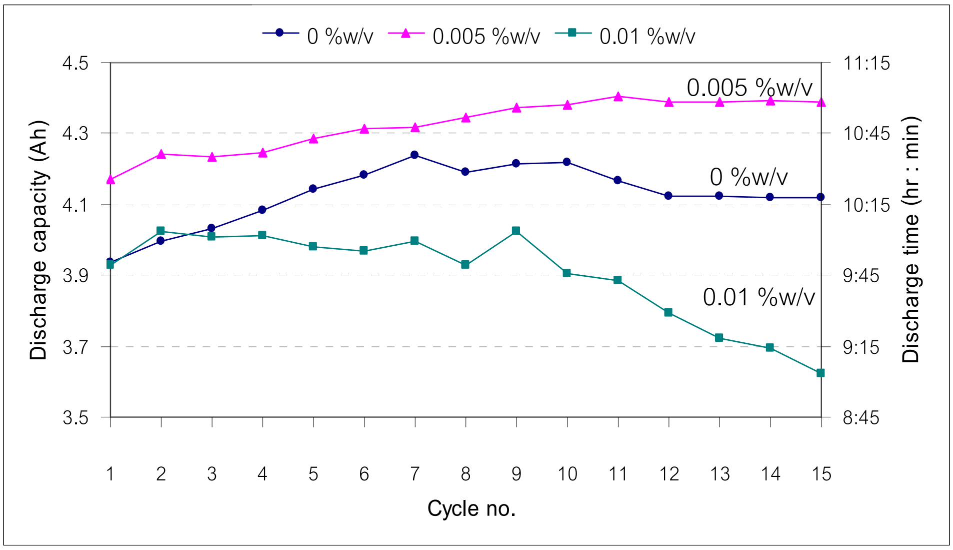
รูปที่ 4.18 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอลิพิร์โรลต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 5 %w/v

3. ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์

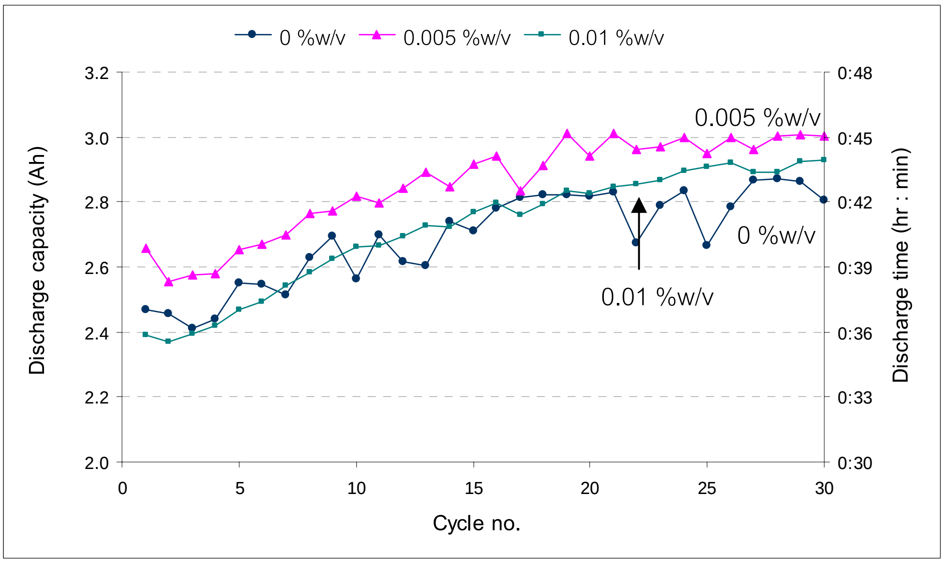
รูปที่ 4.19 ก) แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005 และ 0.01 %w/v ที่ฟูมซิลิกา 4 %w/v เนื่องจากสารประกอบแอลดิไฮด์ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลดังกล่าวข้างต้น จึงไม่สามารถเติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ที่ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีที่สุดได้ จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำพบว่าสารประกอบแอลดิไฮด์ส่งผลต่อค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v จะให้ค่าแน้วโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ดีที่สุด ในขณะที่ปริมาณสารประกอบแอลดิไฮด์ที่ 0.01 %w/v ให้ค่าแนวโน้มความจุการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งและเมื่อพิจารณาในช่วงท้ายของการทดลองพบว่าค่าความจุในการคายประจุแบตเตอรี่ลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นถึงปริมาณสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ที่มากเกินจะส่งผลให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบแอลดิไฮด์นอกจากจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนแล้วความเข้มข้นที่มากเกินอาจเป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยาหลักของแบตเตอรี่ (ปฏิกิริยาการอัด/คายประจุ) ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลง [7]

นอกจากนี้เมื่อนำมาทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุสูงดังแสดงรูปที่ 4.19 ข) พบว่าแบตเตอรี่ที่มีสารประกอบแอลดิไฮด์ความเข้มข้น 0.005 %w/v ยังคงให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ดีที่สุดเช่นเดียวกับการทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ ส่วนแบตเตอรี่ที่มีสารประกอบแอลดิไฮด์ความเข้มข้น 0.01 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง

ก)



ข)



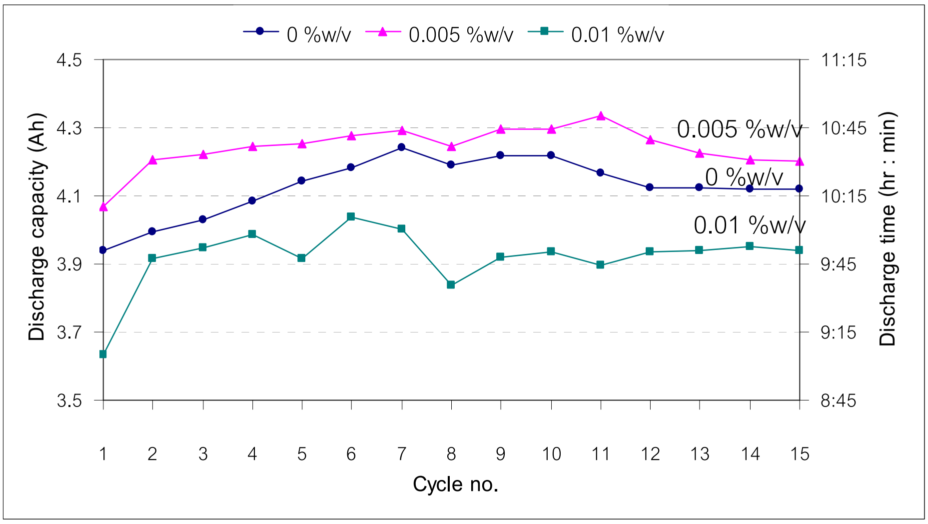
รูปที่ 4.19 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ ที่ปริมาณสารประกอบแอลดิไฮด์ต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

4. ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งวานิลลิน

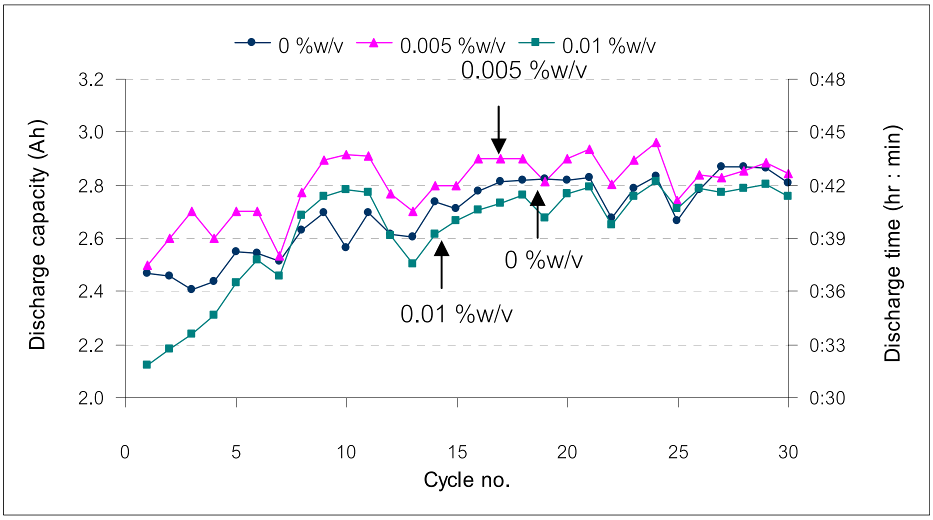
รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งวานิลลินที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005 และ 0.01 %w/v ที่ฟูมซิลิกา 4 %w/v จากผลการทดสอบค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำให้ผลคล้ายกับผลของสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบแอลดิไฮด์และวานิลลินนั้นคล้ายกัน [7] โดยพบว่าสารเติมแต่งวานิลลินส่งผลต่อค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v จะให้ค่าแน้วโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ดีที่สุด ในขณะที่ปริมาณวานิลลินที่ 0.01 %w/v ให้ค่าแนวโน้มความจุการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แสดงให้เห็นถึงปริมาณสารเติมแต่งวานิลลินที่มากเกินจะส่งผลทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของวานิลลินนอกจากจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนแล้วความเข้มข้นที่มากเกินอาจเป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยาหลักของแบตเตอรี่ (ปฏิกิริยาการอัด/คายประจุ) ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลงเช่นเดียวกับสารประกอบแอลดิไฮด์

นอกจากนี้เมื่อนำมาทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุสูงดังแสดงรูปที่ 4.20 ข) พบว่าแบตเตอรี่ที่มีสารเติมแต่งวานิลลินความเข้มข้น 0.005 %w/v ยังคงให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่โดยรวมดีที่สุดเช่นเดียวกับการทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ ส่วนแบตเตอรี่ที่มีสารประกอบวานิลลินความเข้มข้น 0.01 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ต่ำกว่ากับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งเล็กน้อย

ก)



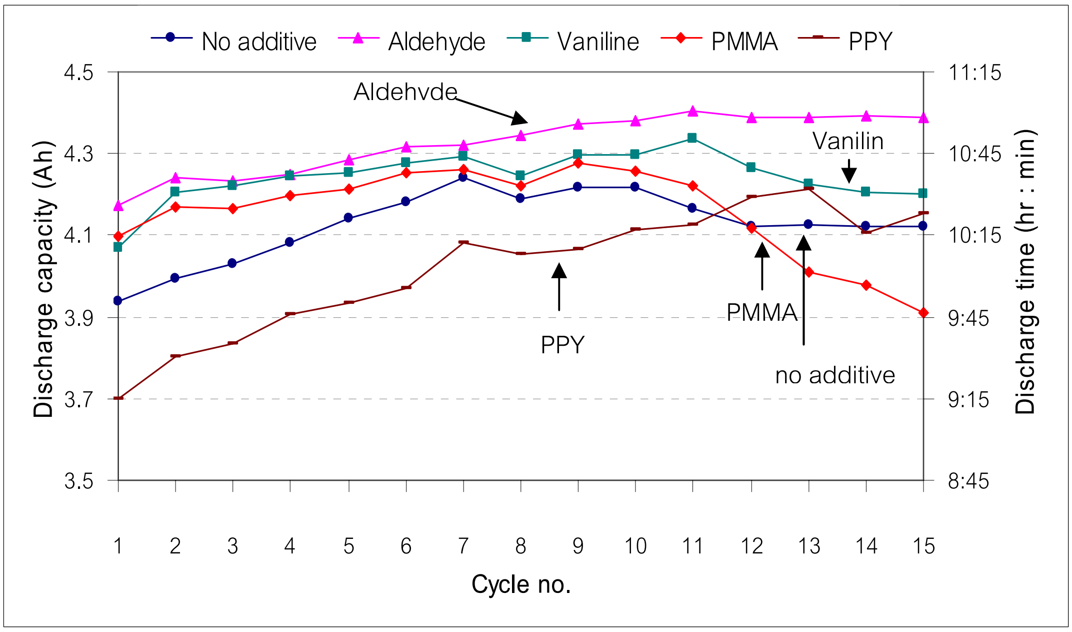
ข)



รูปที่ 4.20 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณสวานิลลินต่างๆ โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

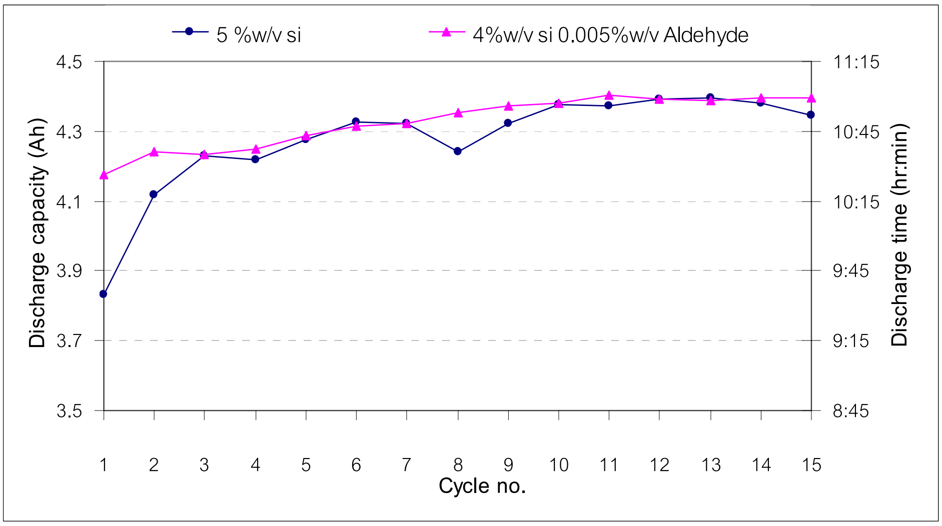
นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบชนิดของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ โดยศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005 %w/v ปริมาณฟูมซิลิกาที่ 4 %w/v ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากในองค์ประกอบนี้สารเติมแต่งทุกชนิดสามารถเติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ได้ เมื่อพิจารณาจากระยะเวลาในการเกิดเจลที่มากกว่า 3 ชั่วโมง จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ (10 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าสารเติมแต่ง สารประกอบแอลดิไฮด์ และวานิลิน ให้ค่าแน้วโน้มความจุในการคาย

ประจุสูงกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง ในขณะที่สารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตให้ค่าการคายประจุในช่วงเริ่มต้นที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แต่จะลดลงอย่างรวดเร็วเห็นได้หลังจากการทดลองในรอบที่ 10 เป็นต้นไป ในทางตรงกันข้ามสารเติมแต่งพอลิพิร์โรลให้ความจุการคายประจุเริ่มต้นที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แต่จะค่อยๆเพิ่มค่าความจุของแบตเตอรี่มากขึ้นเลย ๆ จนกระทั่งได้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แต่อย่างไรก็ตามสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ยังคงให้ค่าความจุในการคายประจุสูงที่สุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในตารางที่ 4.2 พบว่าสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ค่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อยู่ในช่วงร้อย 95 – 97 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพมากกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง (ประสิทธิภาพร้อยละ 92) แสดงว่าสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแบตเตอรี่

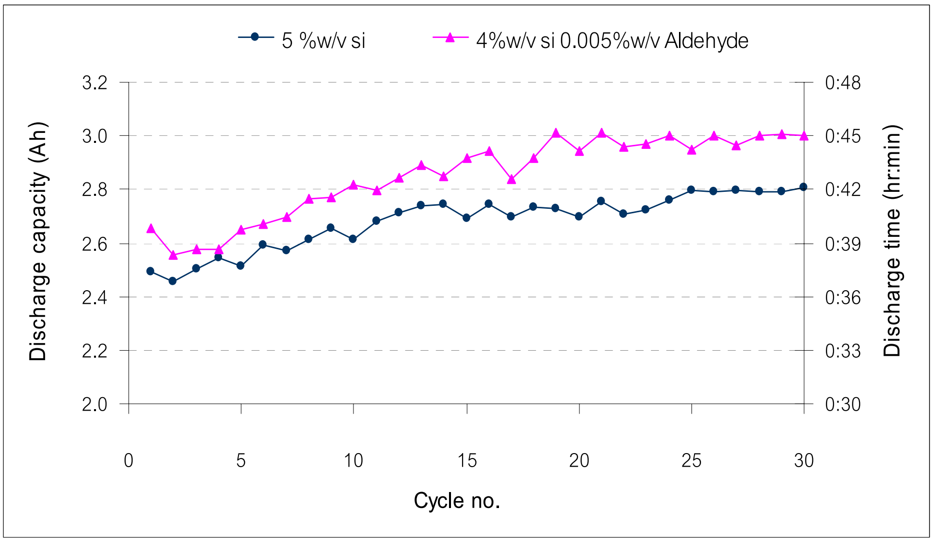


รูปที่ 4.21 แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เมื่อเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 0.005 %w/v โดยมีปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v

ก)



ข)



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่เมื่อเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v กับเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5% w/v แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) การทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) การทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

จากผลการทดสอบต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นพบว่าสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีที่สุดและเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่มีเจลอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกา 5%w/v จากผลการทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.22 ก) พบว่าสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองจะให้แนวโน้มค่าความจุในการคายประจุที่ใกล้เคียงกัน แต่จากผลการทดสอบที่อัตราการคาย

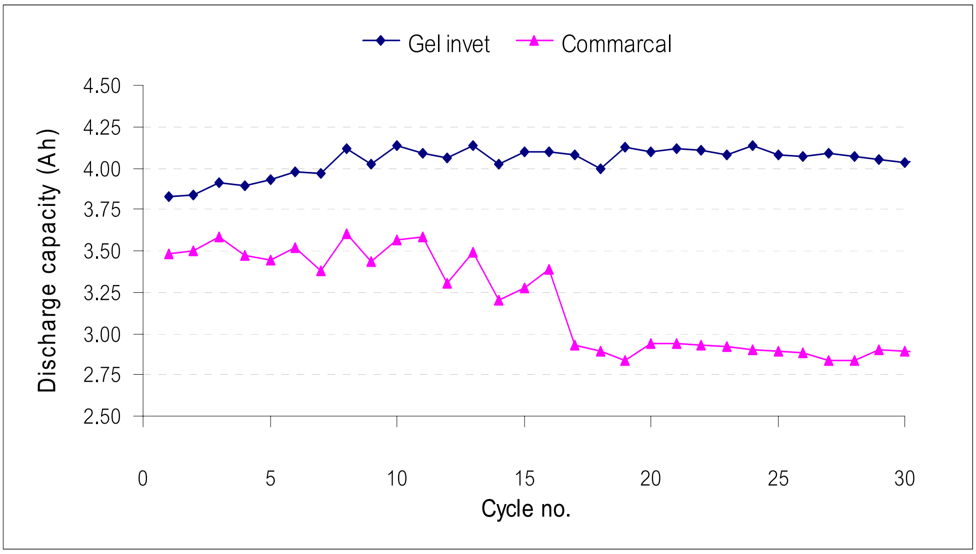
ประจุสูงดังแสดงในรูปที่ 4.22 ข) พบว่าสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v จะให้ค่าความจุในการคายประจุที่มากกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ประมาณร้อยละ 6.34 (จากค่าความจุในการคายประจุเฉลี่ย) และให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สูงกว่าร้อยละ 7.23 และ 2.93 การทดสอบที่อัตราเร็วต่ำและสูงตามลำดับ อีกทั้งสูตรเจลอิเล็ดโทรไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ยังง่ายต่อกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่มากกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ดังนั้นสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v จึงเป็นสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาวล์ควบคุมที่ดีที่สุดในการศึกษานี้

5. ผลการเปรียบเทียบสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่คิดค้นขึ้นกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้า

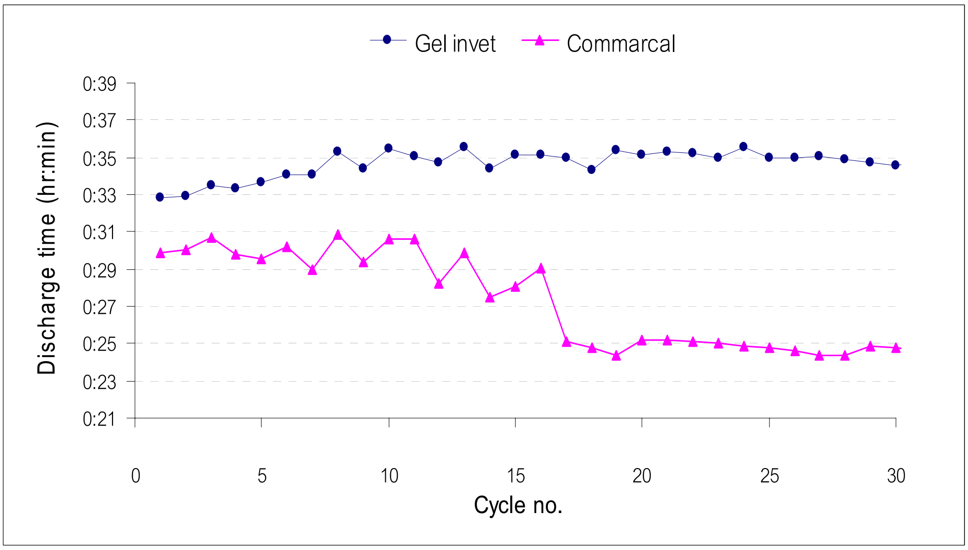
ในการทดสอบส่วนนี้ใช้แบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ 6 ช่อง เพราะเจลแบตเตอรี่ที่ขายตามท้องตลาดในปัจจุบันขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่ใช้ในการทดสอบนั้นไม่มีจำหน่าย สำหรับสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการเปรียบเทียบ คือ เจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 %w/v สารประกอบแอลดิไฮด์ 0.005 %w/v (Gel invent) ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่มีแนวโน้มมากกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าค่อนข้างมาก โดยเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นจะให้ค่าความจุในการคายประจุที่ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าสมรรถนะของแบตเตอรี่จะลดลงและคงที่เมื่อผ่านการทดสอบแล้วประมาณ 17 รอบ นอกจากนี้ยังพบว่าเจลแบตเตอรี่ที่วิจัยขึ้นยังให้ค่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าร้อยละ 6.18

สำหรับตารางที่ 4.2 แสดงสรุปผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยค่าความจุเริ่มต้น ค่าความจุรอบสุดท้าย ค่าความจุเฉลี่ย และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ เมื่อทดสอบด้วยอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

ก)



ข)



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ของเจลบตเตอรี่ที่พัฒนาและคิดค้นขึ้นกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) ก) ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่รอบการทดสอบต่างๆ ข) ระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่รอบการทดสอบต่างๆ

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

Electrolyte formulations		Initial discharge capacity (Ah)		Final discharge capacity (Ah)		Average discharge capacity (Ah)		Average efficiency capacity (%)	
		10 hr	1 hr	10 hr	1 hr	10 hr	1 hr	10 hr	1 hr
Liquid battery (4 Ah/12 V)									
	H_2SO_4	4.51	2.52	3.34	2.3	3.81	2.43	91.90	93.12
	H_2SO_4 + Na_2SO_4 (0%w/v si)	4.90	2.66	3.59	2.32	4.07	2.51	94.09	96.43
	Commercial	4.83	2.26	3.42	2.02	3.92	2.15	93.56	84.79
Gel battery (4 AH/12 V)									
no additive	3 %w/v si	3.97	2.32	4.21	2.61	4.10	2.47	97.01	96.08
	4 %w/v si	3.94	2.47	4.12	2.81	4.13	2.69	92.67	92.19
	5 %w/v si	3.83	2.47	4.35	2.81	4.28	2.68	88.56	95.17
additives									
5 %w/v si	0.005 %w/v PMMA	4.07	-	4.21	-	4.19	-	92.36	-
	0.01 %w/v PMMA	3.83	-	3.90	-	4.00	-	95.24	-
	0.05 %w/v PMMA	3.26	-	3.75	-	3.67	-	93.49	-
	0.005 %w/v PPY	4.06	-	4.31	-	4.25	-	94.61	-
	0.01 %w/v PPY	3.60	-	4.30	-	4.14	-	95.43	-
	0.05 %w/v PPY	3.64	-	3.79	-	3.71	-	92.73	-
4 %w/v si	0.005 %w/v PMMA	4.10	-	3.91	-	4.16	-	96.82	-
	0.005 %w/v PPY	3.73	-	4.20	-	4.05	-	96.37	-
	0.005 %w/v AL	4.17	2.66	4.39	3.00	4.33	2.85	95.79	98.10
	0.01 %w/v AL	3.96	2.39	3.61	2.63	3.93	2.64	93.05	94.51
	0.005 %w/v Va	4.07	2.50	4.20	2.84	4.24	2.80	96.95	93.10
	0.01 %w/v Va	3.66	2.12	3.97	2.76	3.95	2.63	91.54	90.17
Gel battery (7 Ah/12V)									
	Gel invent	-	3.83	-	4.03	-	4.04	-	92.74
	Commercial	-	3.48	-	2.89	-	3.19	-	86.56

“si” refers to fume silica

“PMMA” refers to Polymethyl methacrylate

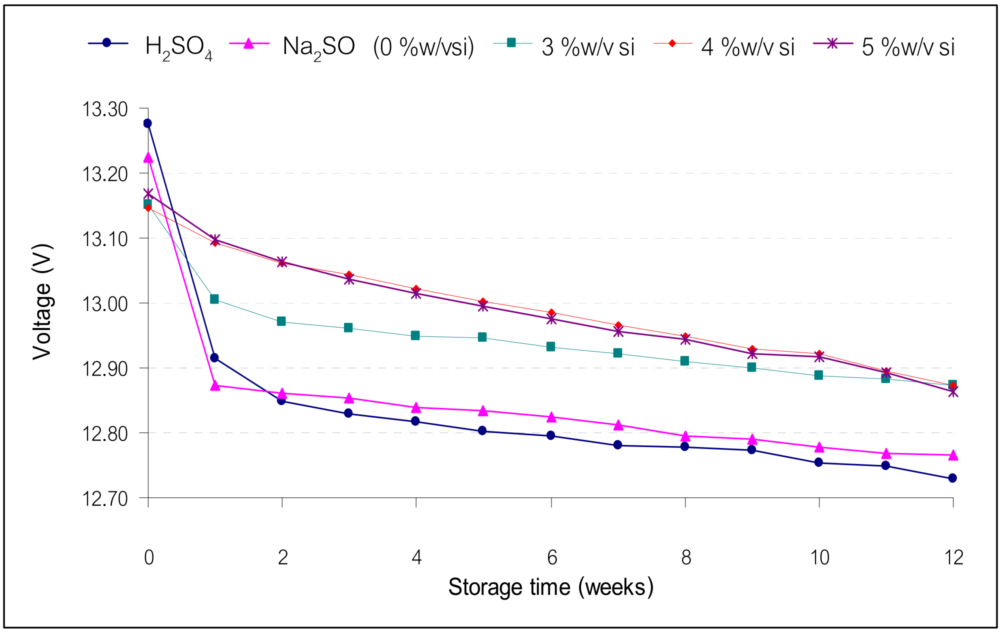
“PPY” refers to Polypyrrole

“Al” refers to Aldehyde

“Va” refers to Vanillin

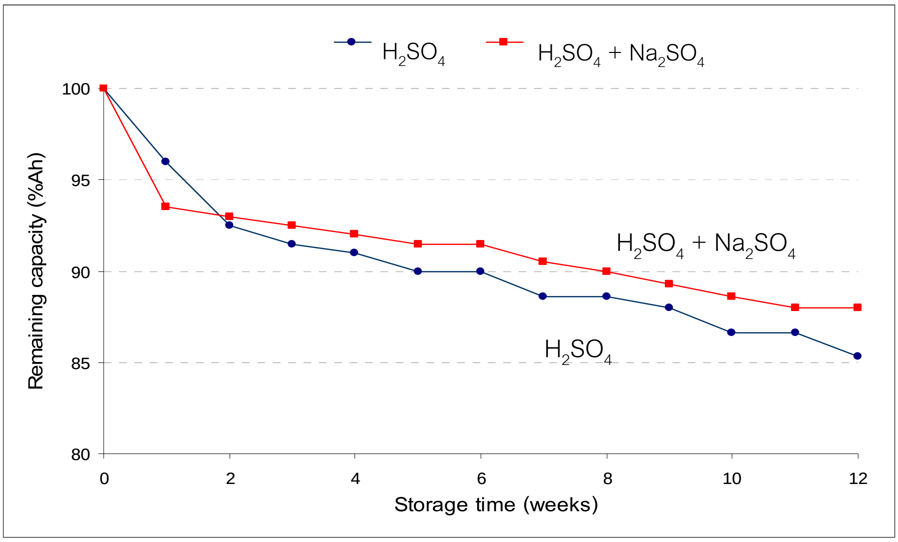
4.3 ผลการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง

ผลการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิเก็บรักษาเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าเมื่อปล่อยแบตเตอรี่ทิ้งไว้ในสภาวะวงจรเปิด แบตเตอรี่จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงตามระยะเวลาที่ทิ้งไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับภายในแบตเตอรี่หรือปฏิกิริยาการคายประจุนั้นเองตามสมการที่ 2.16 [8, 32] นอกจากนี้ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่สามารถบ่งบอกค่าความจุที่ยังคงเหลืออยู่ในแบตเตอรี่ได้ โดยการคำนวณและเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์กับค่าความจุของแบตเตอรี่ในตารางที่ 3.5 ค่าความจุที่ยังคงเหลืออยู่ในแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บแสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.27



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ

4.3.1 ผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต



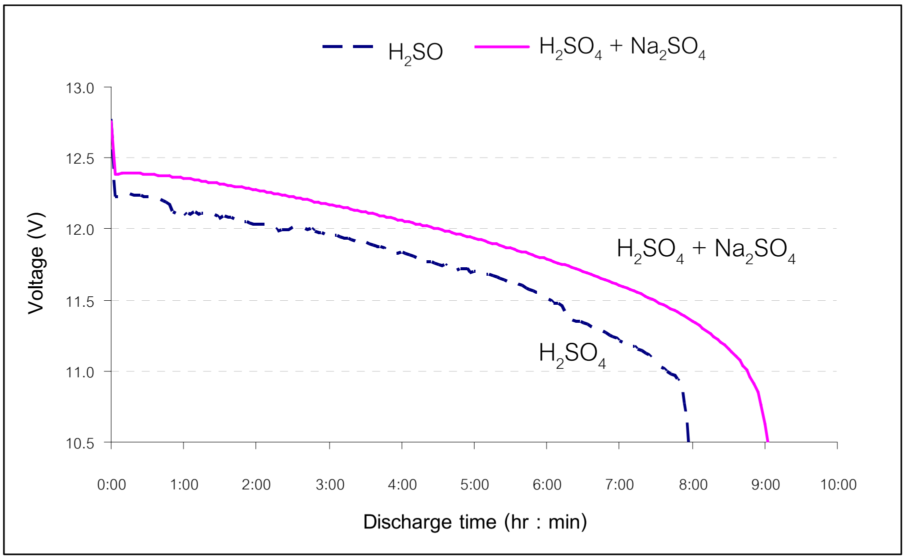
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร

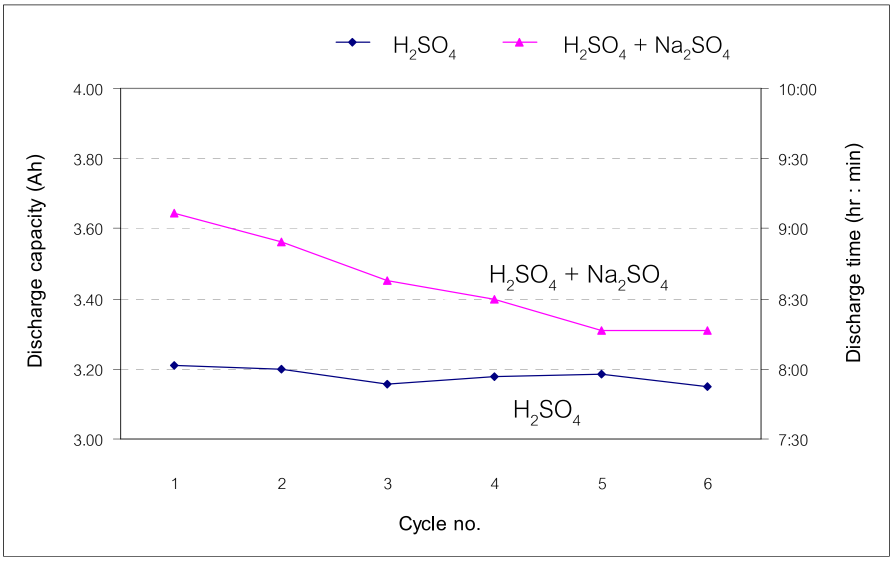
จากรูปที่ 4.25 พบว่าแบตเตอรี่ที่ทำการเติมสารโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้อัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองในช่วงเริ่มต้นเร็วกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟต ที่เป็นเช่นนี้มีเนื่องมาจาก สารโซเดียมซัลเฟตเป็นสารที่มีควมสามารถละลายน้ำได้ดี เกิดการแตกตัวเป็น SO_4^{2-} ตัวซัลเฟตไอออนนั้นส่งผลให้เพิ่มอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเอง โดยซัลเฟตไอออนที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์จะเกิดปฏิกิยาเปลี่ยนเป็น HSO_4^- ตามสมการที่ 4.1 และปฏิกิริยานี้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังนั้นอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองจึงเพิ่มขึ้นในช่วงแรก [32]

$$SO_4^{2-} + H^+ \longleftrightarrow HSO_4^- \qquad (4.1)$$

แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาแนวโน้มโดยรวมจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองพบว่าการเติมสารโซเดียมซัลเฟตช่วยลดอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองเล็กน้อย โดยที่ระยะเวลาการเก็บ 3 เดือนแบตเตอรี่ที่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตให้ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ร้อยละ 88 ในขณะที่แบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตให้ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่อยู่ร้อยละ 85.30 และผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่หลังการเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือนดังแสดงในรูปที่ 4.26 โดยในรูปที่ 4.26 ก) แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ที่เติมสารโซเดียมซัลเฟต

มีความสามารถในการเก็บประจุมากกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารโซเดียมซัลเฟต เพราะให้ระยะเวลาในการคายประจุในรอบแรกที่มากกว่านั้นเอง และเมื่อนำแบตเตอรี่มาทดสอบสมรรถนะในอัตราการคายประจุต่ำจำนวน 5 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.26 ข) พบว่าแบตเตอรี่ที่เติมสารโซเดียมซัลเฟตยังคงให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตเช่นเดิม

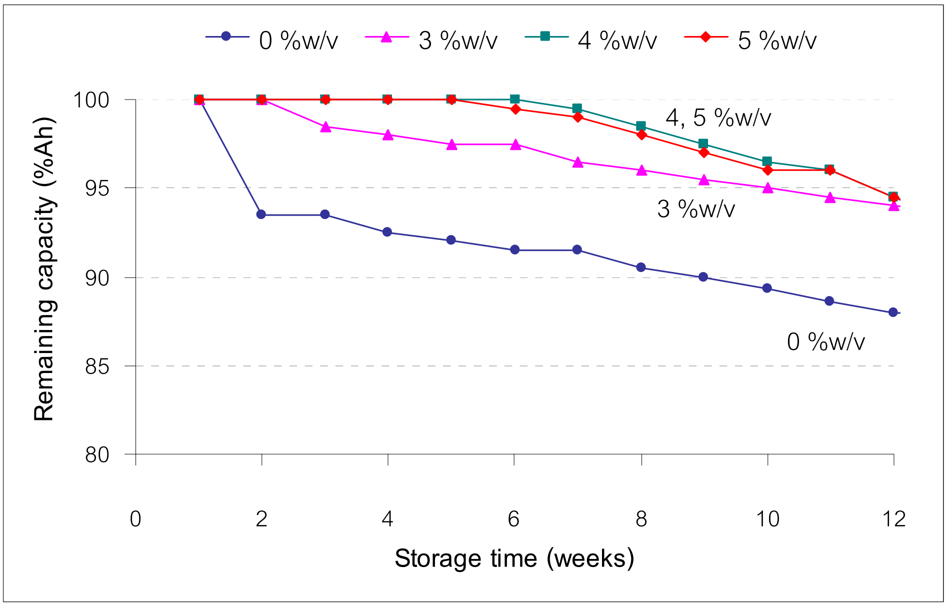




รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองหลังจากเก็บแบตเตอรี่เป็นเวลา 3   เดือน ระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร ก) แสดงค่าความต่างศักย์และระยะเวลาในการคายประจุรอบแรก ข) แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดเหลวและเจลแบตเตอรี่

จากรูปที่ 4.27 พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลว (0 %w/v) มีอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองเร็วกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเจลค่อนข้างมาก โดยเมื่อสิ้นสุดการเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลวเก็บความจุของแบตเตอรี่ได้ร้อยละ 88 ในขณะที่เจลแบตเตอรี่จะเก็บความจุของแบตเตอรี่ได้ร้อยละ 93 แสดงว่าเจลแบตเตอรี่ที่วิจัยขึ้นช่วยลดอัตราในการคายประจุเองประมาณร้อยละ 6 และเมื่อเปรียบเทียบเจลแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3, 4 และ 5 %w/v พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 และ 5 %w/v มีความสามารถในการเก็บประจุได้เต็มในช่วง 5-6 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นจึงเริ่มคายประจุด้วยตัวเอง ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 3 %w/v มีความสามารถในการเก็บประจุได้เต็มในช่วง 2 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นจึงเริ่มคายประจุด้วยตัวเอง



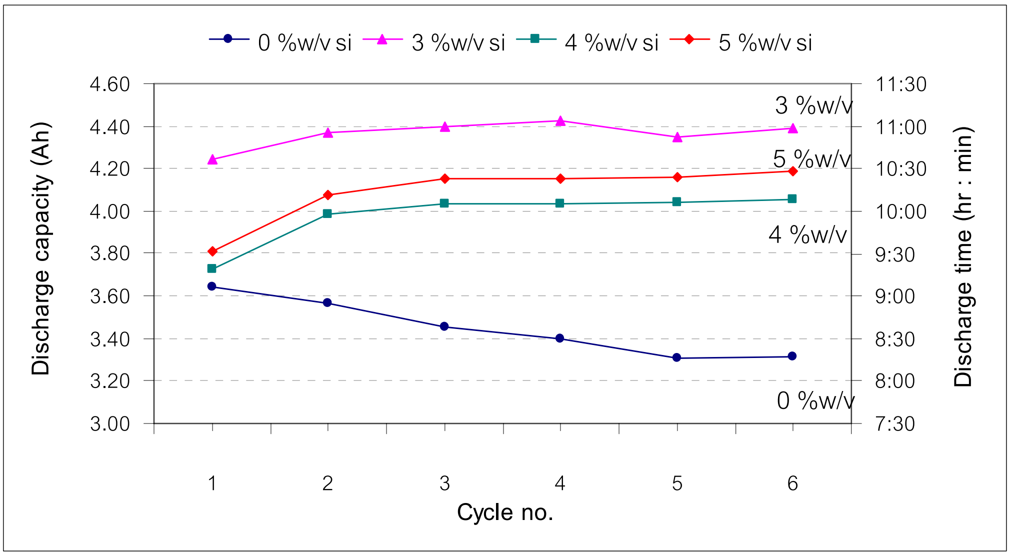
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบเจลแบตเตอรี่ที่วิจัยขึ้นกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ในการค้าของแต่ละบริษัทที่อุณหภูมิการเก็บ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสามารถในการเก็บก่อนการใช้งานที่ดีกว่าหรือมีอัตราการคายประจุด้วยตัวเองที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความจุของแบตเตอรี่หลังจากเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือนของเจลแบตเตอรี่ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับแบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าจากแหล่งต่าง ๆ

เจลแบตเตอรี่	ร้อยละความจุของแบตเตอรี่
งานวิจัยนี้	93
Kung Long Batteries [31]	82
MK Power Batteries [33]	87
Narada Batteries [34]	88
Mastervolt Batteries [35]	90

หลังการเก็บแบตเตอรี่เป็นระยะเวลา 3 เดือน ได้นำแบตเตอรี่เหล่านั้นมาทำการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าเจลแบตเตอรี่ให้สมรรถนะดีกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลว โดยเจลแบตเตอรี่จะให้ลักษณะแนวโน้มของค่าการคายประจุของแบตเตอรี่ในรอบแรกที่ต่ำแต่จะเพิ่มขึ้นจนกระทั้งคงที่ ส่วนแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเหลวจะให้ค่าความจุในการคายประจุรอบแรกที่สูงเช่นเคย แต่จะลดลงจนกระทั้งคงที่ โดยมีค่าความจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ทุกอันตลอดการทดสอบ โดยเมื่อพิจารณาค่าความจุการคายประจุในรอบแรกจะพบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 และ 5 %w/v จะให้ค่าใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเหลว ขณะที่ร้อยละความจุของแบตเตอรี่หลังการเก็บรักษาต่างกัน (รูปที่ 4.27) ที่เป็นเช่นนี้เพราะคุณสมบัติการเป็นไทโซทรอปิกของเจล เมื่อเจลแบตเตอรี่ถูกเก็บเป็นระยะเวลานานไม่มีการใช้หรือไม่มีการให้แรงกับเจล จะทำให้เจลเพิ่มความแข็งขึ้น การเคลื่อนที่ของไอออนภายในแบตเตอรี่จึงทำได้ยาก ดังนั้นในรอบแรกของการทดสอบหลังการเก็บจึงให้ค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่าที่ควร



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง (3 เดือน) ระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดวาล์วควบคุม ในส่วนแรกทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร(1% wt) ที่เติมลงในอิเล็กโทรไลต์เหลว พิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรี ทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำและสูง และทดสอบอัตราการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์ ในส่วนที่สองทำการศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นโดยปราศจากสารเติมแต่งและผลของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ ทำการศึกษาระยะเวลาในการเกิดเจล ความแข็งของเจล พิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรี และทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ เพื่อหาองค์ประกอบที่เหมาะสมของปริมาณฟูมซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าและหาอัตราการคายประจุด้วยตัวเองของเจลแบตเตอรี่เทียบกับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลว ผลการทดลองต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

1. สารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ แต่ส่งผลทำให้แบตเตอรี่มีค่าความจุในการคายประจุเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.85 และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.35 ทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และค่าความจุเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.29 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.55 ทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่เติมโซเดียมซัลเฟต อีกทั้งยังส่งผลให้อัตราในการคายประจุด้วยตัวเองลดลงร้อยละ 3 โดยให้ค่าความจุหลังการเก็บ 3 เดือนร้อยละ 88 ดังนั้นการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์

2. ปริมาณฟูมซิลิกาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลง และให้ค่าความแข็งของเจลมากขึ้น สารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิพิโรลไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล ในขณะที่ปริมาณสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด วานิลลิน และพอลิแอคริลา-

ไมด์ที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณพอลิแอคริ-ลาไมด์ที่ 0.03 %w/v ที่ปริมาณฟูมซิลิกา 3 %w/v จะเกิดการตกตะกอนขึ้น

3. จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีพบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง ในขณะที่ปริมาณฟูมซิลิกาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง แต่จะไม่ส่งผลเมื่อปริมาณฟูมซิลิกาเกินกว่า 4 %w/v นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์และวานิลลินยังส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงกว่าเดิมอีกด้วย ในขณะที่สารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิพิร์โรล ไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจน

4. จากการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ พบว่าเจลแบตเตอรี่จะให้ค่าการคายประจุเริ่มต้นที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลว แต่จะให้ค่าความจุการคายประจุเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบการทดสอบมากขึ้น ขณะที่แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวจะให้ค่าการคายประจุลดลงเมื่อจำนวนรอบการทดสอบมากขึ้น เจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ให้ค่าความจุในการคายประจุที่มากที่สุด สำหรับเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v เติมสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิพิร์โรลพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณจะส่งผลทำให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ลดลง และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 4 %w/v เมื่อเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮด์และวานิลลินที่ 0.005 %w/v จะให้ค่าความจุประจุของแบตเตอรี่ที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แต่จะส่งผลให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม

5. เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกา 4 %w/v ปริมาณสารประกอบแอลดิ-ไฮด์ 0.005 %w/v ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยสมรรถนะที่อัตราการคายประจุต่ำจะให้ค่าความจุในการคายประจุใกล้เคียงกับเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v แต่ให้สมรรถนะที่อัตราการคายประจุสูง สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ประมาณร้อยละ 6.34 และให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สูงกว่าร้อยละ 7.23 และ 2.93 การทดสอบที่อัตราเร็วต่ำและสูงตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าพบว่าเจลแบตเตอรี่ที่พัฒนาขึ้นให้ค่าความจุหรือระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งยังให้ค่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าร้อยละ 6.18

6. เจลแบตเตอรี่ให้อัตราการคายประจุที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเหลวหลังการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยเหลือค่าความจุร้อยละ 93 ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าและมีค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่หลังการเก็บที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลว

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากระยาที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ค่อนข้างนานมากและมีอุปกรณ์ที่จำกัด จึงทำให้ผลการทดสอบแบตเตอรี่ที่ได้ยังอยู่ในรอบการใช้งานที่สั้น ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้จะเห็นแนวโน้มความแตกต่างของอิเล็กโทรไลต์แต่ละสูตรก็ตาม แต่ก็ยังไม่สามารถบอกถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่วิจัยขึ้นได้ หากทำการทดสอบจำนวนรอบได้มากกว่านี้งานวิจัยนี้จะสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

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] Tsunenori, Y., Hiroshi Y. Development of maintenance – free calcium (MFDC) lead-acid battery for automotive use. J. Power Sources 158 (2006): 1091-1095.

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

[4] Weighall, M.J. Techniques for jar formation of valve-regulated lead–acid batteries, J. Power Sources 116 (2003): 219-231.

[5] 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.

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

[7] Dietz, H., Hoogestraat, G., Laibach, S., Von Borstel. D., Wiesener, k. Influence of substituted benzaldehydes and their derivatives as inhibitors for hydrogen evolution in lead/acid batteries. J. Power Sources 53 (1995): 359-365.

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

[12] 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.

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

[14] 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 [2010, January 27].

[15] Nuclear Power Fundamental, Battery components and operation [online]. Available from: http://www.tpub.com/content/doe/hdbk1084/index.htm [2010, January 30].

[16] Hehner, N.E. Storage battery manufacturing manual, United States of America: Independent battery manufacturers association, 1986.

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

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

[19] BD battery, Battery Types and Comparisons [online]. Available from : http:// www. bdbatteries.com/batterycomparison.php [2010, February 3].

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

[21] Rusch, W., Vassallo, K., Hart G. Understanding the real differences between gel and AGM batteries [online]. Available from: http:// www.battcon.com/ paperfinal 2007/rushpaper2007.pdf [2010, January 23].

[22] Hern´andez, J.C., Soria, M.L., Gonz´alez, M., Garc´ıa-Quismondo, E., Mu˜noz, 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.

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

[24] มหาวิทยาลัยมหิดล. โวแทมเมทรี [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/anal_votammetry3.htm [2553, มกราคม 23].

[25] Behzad, R., Shadpour, M., Mahmood, T. Application of ionic liquids as an electrolyte additive on the electrochemical behavior of lead acid battery. J. Power Sources 187 (2009): 605-612.

[26] 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.

[27] Zheng T., Jianming W.*, Xian-xian M., Haibo S., Quanqi C., Zhihua X., Jianqing Z. Investigation and application of polysiloxane-based gel electrolyte in valve-regulated lead-acid battery. J. Power Sources 168 (2007): 49–57.

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

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

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

[31] 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 [2009, September 27].

[32] 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.

[33] MK battery co., Ltd, The sealed Battery Specialists [online]. Available from: www.homewind.net/pdf/products/23974_1.pdf [2009, September 27]

[34] 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 [2009, September 27]

[35] Mastervolt BV CO., LTD, USERS MANUAL 12 V GEL BATTERY [online]. Available from: www.suremarine.com/manuals/assorted-information/mastervolt-gel-batt.pdf [2009, September 27]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. การเตรียมกรดซัลฟิวริก

ต้องการเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความถ่วงจำเพาะ 1.325 (เป็นความเข้มข้นที่ใช้ในโรงงาน) จำนวน 1000 มิลลิลิตร จากตาราง ก.1 เทียบเป็นความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 5.8 โมลต่อลิตร โดยเตรียมสารละลายจากกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 17.8 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

$$17.8(V_1) = 5.8(1000)$$

$$V_1 = 325.84 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น จะต้องใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 17.8 โมลต่อลิตร จำนวน 325.84 มิลลิลิตร

ตาราง ก.1 ค่าพารามิเตอร์ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น (kg/L) ความเข้มข้นในหน่วย mol/L และ mol/kgH_2O ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบวกและลบเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน [12]

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
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
1.36	46.74	6.482	8.949	2.208	1.778	-0.430
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

2. การหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ในแต่ละรอบการใช้งานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 เช่น ในเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟูมซิลิกา 5 %w/v ได้ค่าในการทดสอบดังนี้

Number of cycle	Charge (Ah)	Discharge (Ah)
1	5.97	3.83
2	5.59	4.12
3	5.57	4.23

ต้องการคำนวณหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ในรอบที่ 3 สามารถคำนวณได้ ดังนี้

ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ = (4.23/5.57) x 100

= 75.94 %

ภาคผนวก ข

ตารางรวมผลการทดสอบแบตเตอรี่

ตารางที่ ข.1 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

Number of cycles	Commercial				H_2SO_4				$H_2SO_4 + Na_2SO_4$			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.29	4.83	12:00:59	-	2.36	4.51	11:10:52	-	2.41	4.90	12:10:46	-
2	4.99	4.68	11:37:08	93.84	4.70	4.38	10:51:31	93.07	5.31	4.92	12:13:25	92.66
3	4.80	4.46	11:04:47	93.08	4.51	4.22	10:28:17	93.55	5.03	4.62	11:28:13	91.86
4	4.62	4.19	10:24:24	90.83	4.41	4.09	10:08:47	92.64	4.77	4.40	10:56:03	92.38
5	4.25	4.10	10:11:00	96.54	4.37	4.02	9:59:15	92.06	4.60	4.22	10:28:48	91.84
6	4.11	3.99	9:54:15	97.17	4.17	3.91	9:42:35	93.88	4.44	4.13	10:15:12	93.04
7	4.04	3.88	9:37:42	96.04	4.12	3.82	9:28:58	92.65	4.33	4.03	10:00:40	93.20
8	3.96	3.79	9:24:35	95.73	4.09	3.73	9:14:42	90.99	4.21	3.83	9:30:13	90.97
9	4.14	3.70	9:11:06	89.33	4.00	3.81	9:26:45	95.25	4.12	3.83	9:30:49	92.92
10	3.94	3.66	9:05:13	92.82	4.04	3.59	8:54:15	88.79	3.84	3.81	9:27:15	99.27
11	3.79	3.58	8:53:17	94.58	3.86	3.46	8:35:11	89.52	3.90	3.79	9:24:47	97.13
12	3.81	3.54	8:46:44	92.91	3.80	3.47	8:37:12	91.49	3.97	3.69	9:10:20	92.98
13	3.84	3.48	8:38:21	90.63	3.70	3.45	8:34:07	93.35	3.83	3.67	9:06:48	95.80
14	3.71	3.46	8:35:52	93.42	3.77	3.36	8:19:45	89.11	3.71	3.62	8:59:49	97.68
15	3.68	3.42	8:29:26	92.88	3.70	3.34	8:17:48	90.28	3.75	3.59	8:54:40	95.60
Average	4.12	3.92	9:43:39	93.56	4.09	3.81	9:27:20	91.90	4.27	4.07	10:06:31	94.09

ตารางที่ ข.2 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่างกัน ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

Number of cycles	3 %w/v				4 %w/v				5 %w/v				6 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.30	3.97	10:07:24	-	2.17	3.94	9:46:31	-	2.97	3.83	9:28:45	-	1.64	2.60	6:25:45	-
2	4.09	3.97	10:07:18	97.14	4.68	4.00	9:55:18	85.44	5.59	4.12	10:11:00	73.62	3.34	2.79	6:54:42	83.65
3	4.07	4.01	10:10:58	98.60	4.61	4.03	10:00:29	87.48	5.57	4.23	10:27:35	75.90	3.26	2.86	7:04:59	87.93
4	4.05	4.04	10:11:51	99.85	4.52	4.08	10:08:08	90.41	5.24	4.22	10:26:10	80.58	3.28	2.87	7:05:19	87.30
5	4.09	4.07	10:13:08	99.61	4.65	4.14	10:16:57	89.06	5.04	4.28	10:34:33	84.86	3.27	2.91	7:11:47	88.96
6	4.18	4.12	10:16:44	98.73	4.71	4.18	10:22:49	88.79	4.80	4.33	10:41:57	90.16	3.32	-	-	-
7	4.19	4.14	10:16:49	98.97	4.73	4.24	10:31:34	89.72	4.69	4.32	10:43:09	92.10	-	-	-	-
8	4.15	4.12	10:08:55	99.23	4.75	4.19	10:24:00	88.28	4.75	4.24	10:31:16	89.35	-	-	-	-
9	4.39	4.14	10:14:03	94.32	4.36	4.22	10:28:04	96.81	4.59	4.32	10:43:09	94.20	-	-	-	-
10	4.43	4.18	10:12:18	94.20	4.40	4.22	10:28:24	95.97	4.67	4.38	10:51:01	93.66	-	-	-	-
11	4.38	4.13	10:00:17	94.20	4.31	4.17	10:20:39	96.73	4.76	4.37	10:50:15	91.81	-	-	-	-
12	4.31	4.15	9:56:41	96.26	4.25	4.12	10:14:11	97.01	4.72	4.39	10:53:12	92.97	-	-	-	-
13	4.37	4.11	9:48:24	94.16	4.19	4.12	10:14:29	98.50	4.72	4.40	10:54:00	93.10	-	-	-	-
14	4.21	4.19	9:48:34	99.69	4.28	4.12	10:13:46	96.22	4.65	4.38	10:51:38	94.29	-	-	-	-
15	4.52	4.21	9:42:40	93.14	4.25	4.12	10:06:11	96.92	4.66	4.35	10:45:00	93.28	-	-	-	-
Average	4.24	4.10	10:05:04	97.01	4.48	4.13	10:14:06	92.67	4.89	4.28	10:35:31	88.56	3.29	2.81	6:56:30	86.96

ตารางที่ ข.3 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 5 %w/v และสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต ปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v				0.05 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.72	4.07	10:03:30	-	1.28	3.83	9:29:22	-	2.29	3.26	8:03:39	-
2	4.61	4.17	10:18:13	90.39	4.33	3.93	9:45:40	90.91	4.18	3.51	8:41:34	84.00
3	4.53	4.18	10:19:30	92.24	4.21	4.00	9:56:06	95.17	4.04	3.62	8:57:45	89.67
4	4.51	4.16	10:17:27	92.30	4.15	4.05	10:03:29	97.64	4.06	3.66	9:03:08	90.07
5	4.40	4.17	10:18:30	94.68	4.25	4.05	10:03:53	95.30	3.88	3.68	9:06:25	94.84
6	4.42	4.20	10:23:06	95.06	4.32	4.05	10:02:54	93.66	3.92	3.69	9:08:35	94.31
7	4.47	4.22	10:26:33	94.45	4.26	4.06	10:05:17	95.33	3.81	3.72	9:12:35	97.56
8	4.51	4.12	10:11:58	91.52	4.36	4.04	10:01:32	92.61	3.87	3.66	9:03:50	94.53
9	4.50	4.22	10:25:43	93.65	4.17	4.05	10:02:29	96.98	4.00	3.78	9:20:58	94.54
10	4.57	4.23	10:27:58	92.58	4.25	4.01	9:57:38	94.45	4.09	3.78	9:20:40	92.30
11	4.65	4.21	10:24:21	90.55	4.08	4.07	10:06:39	99.85	3.98	3.78	9:21:34	95.10
12	4.56	4.23	10:27:41	92.78	4.32	4.01	9:56:39	92.82	3.88	3.74	9:15:18	96.37
13	4.66	4.22	10:26:06	90.59	4.08	3.95	9:48:29	96.81	3.96	3.75	9:16:56	94.77
14	4.68	4.21	10:24:48	90.03	4.12	3.94	9:47:23	95.80	3.87	3.73	9:14:09	96.46
15	4.56	4.21	10:24:20	92.18	4.06	3.90	9:40:35	96.08	3.97	3.75	9:16:39	94.34
Average	4.54	4.19	10:21:19	92.36	4.21	4.00	9:55:12	95.24	3.96	3.67	9:05:35	93.49

ตารางที่ ข.4 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 5 %w/v และสารเติมแต่งพอลิพิโรลปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v				0.05 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	2.02	4.06	10:03:56	-	1.25	3.60	8:55:43	-	1.42	3.64	9:01:23	-
2	4.80	4.20	10:25:56	87.67	4.24	3.90	9:40:22	91.94	3.96	3.57	8:52:13	90.21
3	4.70	4.23	10:28:58	89.97	4.27	4.01	9:56:26	93.80	3.86	3.64	9:01:10	94.12
4	4.62	4.19	10:24:28	90.82	4.35	4.07	10:05:22	93.58	3.83	3.69	9:08:52	96.34
5	4.43	4.22	10:28:49	95.31	4.31	4.13	10:14:04	95.75	3.91	3.70	9:10:25	94.58
6	4.44	4.25	10:33:15	95.88	4.37	4.17	10:20:52	95.40	4.18	3.77	9:21:50	90.24
7	4.54	4.27	10:35:07	94.07	4.36	4.22	10:27:16	96.70	4.09	3.72	9:13:56	90.91
8	4.50	4.22	10:27:43	93.75	4.39	4.15	10:16:44	94.48	4.03	3.65	9:03:14	90.52
9	4.42	4.27	10:35:53	96.74	4.36	4.20	10:24:58	96.37	3.99	3.70	9:10:11	92.65
10	4.49	4.29	10:39:13	95.74	4.42	4.25	10:32:22	96.07	3.89	3.71	9:12:24	95.30
11	4.43	4.30	10:40:28	97.15	4.39	4.26	10:33:13	96.99	3.99	3.71	9:12:00	92.84
12	4.47	4.31	10:41:36	96.38	4.41	4.27	10:35:16	96.85	3.90	3.74	9:16:16	95.72
13	4.47	4.31	10:41:40	96.38	4.45	4.27	10:35:56	96.07	4.06	3.81	9:26:29	93.79
14	4.45	4.29	10:38:41	96.40	4.48	4.30	10:39:30	95.89	4.22	3.79	9:24:39	89.79
15	4.39	4.31	10:41:48	98.25	4.47	4.30	10:39:19	96.15	4.16	3.79	9:24:12	91.17
Average	4.51	4.25	10:32:30	94.61	4.38	4.14	10:15:50	95.43	4.01	3.71	9:11:57	92.73

ตารางที่ ข.5 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิไฮดปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.65	4.17	10:19:09	-	1.66	3.96	9:49:21	-
2	4.38	4.24	10:29:22	96.89	4.45	4.06	10:03:41	91.14
3	4.48	4.23	10:28:14	94.44	4.40	4.04	10:01:29	91.88
4	4.48	4.25	10:30:28	94.78	4.30	4.04	10:01:47	94.02
5	4.53	4.29	10:36:09	94.66	4.24	4.01	9:57:15	94.67
6	4.51	4.32	10:40:26	95.68	4.26	4.00	9:55:30	94.01
7	4.45	4.32	10:41:05	96.97	4.23	4.03	9:59:18	95.09
8	4.58	4.35	10:46:10	94.93	4.25	3.96	9:49:27	93.07
9	4.63	4.37	10:49:06	94.39	4.30	4.05	10:03:21	94.23
10	4.56	4.38	10:50:08	96.10	4.26	3.94	9:45:53	92.35
11	4.57	4.41	10:53:45	96.37	4.28	3.92	9:43:00	91.48
12	4.55	4.39	10:51:33	96.40	4.27	3.82	9:28:47	89.53
13	4.56	4.39	10:51:11	96.27	3.99	3.75	9:18:03	94.03
14	4.57	4.39	10:52:12	96.11	3.93	3.72	9:14:12	94.73
15	4.52	4.39	10:52:11	97.12	3.90	3.61	9:03:44	92.49
Average	4.53	4.33	10:42:05	95.79	4.22	3.93	9:44:59	93.05

ตารางที่ ข.6 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งวานิลลินปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.79	4.07	10:09:15	-	1.75	3.66	9:04:58	-
2	4.53	4.21	10:29:33	92.89	4.94	3.94	9:47:08	79.75
3	4.58	4.22	10:31:48	92.12	4.58	3.98	9:51:54	86.75
4	4.63	4.25	10:35:15	91.78	4.36	4.02	9:57:51	92.02
5	4.51	4.25	10:35:17	94.30	4.41	3.96	9:47:09	89.81
6	4.50	4.28	10:36:54	95.15	4.22	4.07	10:05:46	96.44
7	4.31	4.29	10:39:12	99.65	4.41	4.03	10:00:12	91.49
8	4.33	4.25	10:32:16	98.10	4.23	3.87	9:35:22	91.48
9	4.32	4.30	10:39:46	99.47	4.27	3.95	9:48:10	92.59
10	4.33	4.30	10:40:04	99.35	4.30	3.96	9:50:01	92.25
11	4.34	4.34	10:45:44	99.95	4.22	3.93	9:44:31	93.06
12	4.34	4.26	10:35:01	98.32	4.21	3.96	9:50:07	94.11
13	4.28	4.22	10:29:10	98.69	4.23	3.97	9:51:06	93.79
14	4.25	4.21	10:26:24	98.85	4.21	3.98	9:52:30	94.65
15	4.26	4.20	10:24:31	98.64	4.25	3.97	9:50:50	93.39
Average	4.39	4.24	10:32:41	96.95	4.34	3.95	9:47:50	91.54

ตารางที่ ข.7 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และ 0.005 %w/v ของสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับพอลิพิโรล ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง)

Number of cycles	PMMA				PPY			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.66	4.10	10:08:06	-	1.39	3.73	9:15:09	-
2	4.53	4.17	10:18:41	91.95	4.04	3.85	9:30:40	95.39
3	4.46	4.17	10:18:05	93.39	4.03	3.87	9:35:09	95.88
4	4.44	4.20	10:22:48	94.48	4.04	3.94	9:46:01	97.60
5	4.40	4.21	10:25:02	95.73	4.08	3.97	9:49:58	97.13
6	4.40	4.25	10:30:44	96.64	4.09	4.00	9:55:36	97.80
7	4.34	4.26	10:32:28	98.18	4.19	4.12	10:12:16	98.28
8	4.46	4.22	10:26:36	94.66	4.32	4.10	10:08:06	94.93
9	4.31	4.28	10:34:40	99.23	4.40	4.11	10:10:02	93.52
10	4.30	4.26	10:31:55	99.09	4.34	4.15	10:17:01	95.64
11	4.29	4.22	10:26:16	98.48	4.40	4.16	10:18:41	94.57
12	4.25	4.12	10:00:59	96.92	4.33	4.23	10:29:06	97.81
13	4.04	4.01	9:55:25	99.38	4.42	4.25	10:32:08	96.07
14	4.02	3.98	9:51:00	98.93	4.37	4.14	10:16:03	94.80
15	3.97	3.91	9:30:44	98.44	4.21	4.20	10:23:06	99.71
Average	4.30	4.16	10:15:34	96.82	4.23	4.05	10:02:36	96.37

ตารางที่ ข.8 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	Commercial				H2SO4				H2SO4 + Na2SO4			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.17	2.26	0:33:58	-	1.45	2.52	0:37:48	-	1.18	2.66	0:39:58	-
2	2.77	2.13	0:31:58	76.96	2.73	2.45	0:36:42	89.74	2.82	2.53	0:37:58	89.88
3	2.58	2.13	0:31:59	82.73	2.59	2.42	0:36:14	93.44	2.62	2.53	0:37:59	96.49
4	2.58	2.15	0:32:17	83.35	2.53	2.43	0:36:28	96.05	2.63	2.55	0:38:17	97.07
5	2.59	2.12	0:31:45	81.83	2.53	2.44	0:36:37	96.44	2.63	2.52	0:37:45	95.56
6	2.56	2.17	0:32:29	84.74	2.52	2.48	0:37:08	98.41	2.60	2.57	0:38:29	98.58
7	2.60	2.14	0:32:06	82.21	2.56	2.49	0:37:19	97.27	2.65	2.54	0:38:06	95.85
8	2.57	2.16	0:32:28	84.30	2.57	2.50	0:37:31	97.28	2.61	2.56	0:38:28	98.09
9	2.60	2.19	0:32:51	84.30	2.57	2.52	0:37:44	98.05	2.65	2.59	0:38:51	97.92
10	2.62	2.15	0:32:15	82.16	2.59	2.53	0:37:57	97.68	2.66	2.55	0:38:15	95.72
11	2.58	2.20	0:32:58	85.13	2.60	2.54	0:38:09	97.69	2.63	2.60	0:38:58	98.82
12	2.63	2.21	0:33:12	84.11	2.61	2.56	0:38:25	98.08	2.68	2.61	0:39:12	97.57
13	2.65	2.22	0:33:21	83.92	2.63	2.56	0:38:28	97.34	2.70	2.62	0:39:21	97.29
14	2.66	2.22	0:33:14	83.34	2.63	2.57	0:38:37	97.72	2.71	2.62	0:39:14	96.67
15	2.64	2.16	0:32:28	81.94	2.64	2.49	0:36:58	94.32	2.69	2.56	0:38:28	95.39

ตารางที่ ข.8(ต่อ) เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	Commercial				H2SO4				H2SO4 + Na2SO4			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
16	2.60	2.18	0:32:46	84.16	2.66	2.50	0:37:16	93.98	2.64	2.58	0:38:46	97.80
17	2.61	2.13	0:31:53	81.36	2.66	2.30	0:34:53	86.47	2.66	2.53	0:37:53	94.96
18	2.55	2.24	0:32:09	87.89	2.64	2.40	0:35:09	90.91	2.60	2.54	0:38:09	97.85
19	2.57	2.13	0:31:53	82.66	2.66	2.42	0:34:53	90.98	2.62	2.53	0:37:53	96.45
20	2.55	2.19	0:32:47	85.76	2.68	2.41	0:34:17	89.93	2.60	2.49	0:37:17	95.76
21	2.51	2.20	0:32:57	87.50	2.67	2.40	0:34:27	89.89	2.56	2.50	0:37:27	97.62
22	2.52	2.14	0:32:07	84.83	2.66	2.39	0:33:37	89.85	2.57	2.44	0:36:37	94.94
23	2.47	2.13	0:31:59	86.49	2.64	2.38	0:33:29	90.15	2.51	2.43	0:36:29	96.82
24	2.46	2.13	0:31:59	86.70	2.63	2.36	0:33:29	89.73	2.51	2.43	0:36:29	97.05
25	2.46	2.13	0:31:59	86.63	2.61	2.35	0:33:29	90.04	2.51	2.43	0:36:29	96.97
26	2.46	2.11	0:31:38	85.59	2.60	2.34	0:33:08	90.00	2.51	2.41	0:36:08	95.94
27	2.44	2.09	0:31:20	85.65	2.59	2.32	0:32:50	89.58	2.49	2.39	0:35:50	96.10
28	2.42	2.06	0:30:56	85.21	2.58	2.32	0:32:26	89.92	2.47	2.36	0:35:26	95.74
29	2.39	2.03	0:30:28	84.87	2.56	2.30	0:31:58	89.84	2.44	2.33	0:34:58	95.53
30	2.36	2.02	0:30:14	85.32	2.56	2.30	0:31:44	89.84	2.41	2.32	0:34:44	96.10
Average	2.55	2.15	0:32:13	84.19	2.61	2.43	0:35:38	93.12	2.60	2.51	0:37:35	96.43

ตารางที่ ข.9 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่างกัน ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	3 %w/v				4 %w/v				5 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity e (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.38	2.32	0:34:46	-	1.95	2.47	0:37:24	-	1.24	2.47	0:37:22	-
2	2.53	2.21	0:33:12	87.61	2.92	2.46	0:37:14	84.12	2.84	2.46	0:36:50	86.57
3	2.37	2.26	0:33:51	95.27	2.78	2.41	0:36:30	86.75	2.66	2.50	0:37:31	93.92
4	2.40	2.26	0:33:55	94.21	2.82	2.44	0:36:56	86.39	2.72	2.55	0:38:11	93.74
5	2.39	2.32	0:34:44	96.86	2.83	2.55	0:38:39	90.17	2.73	2.52	0:37:44	92.26
6	2.45	2.35	0:35:14	95.84	2.77	2.55	0:38:34	91.84	2.70	2.59	0:38:53	96.14
7	2.48	2.39	0:35:46	96.17	2.77	2.51	0:38:04	90.65	2.77	2.57	0:38:33	92.88
8	2.51	2.40	0:35:58	95.46	2.75	2.63	0:39:51	95.60	2.72	2.61	0:39:12	96.14
9	2.52	2.36	0:35:25	93.73	2.87	2.70	0:40:51	93.90	2.77	2.66	0:39:50	95.85
10	2.47	2.41	0:36:04	97.25	2.87	2.56	0:38:49	89.14	2.80	2.61	0:39:11	93.42
11	2.52	2.45	0:36:40	96.99	2.73	2.70	0:40:52	98.97	2.76	2.68	0:40:14	97.28
12	2.55	2.42	0:36:21	94.98	2.90	2.62	0:39:37	90.17	2.83	2.71	0:40:41	95.93
13	2.53	2.47	0:36:59	97.39	2.83	2.61	0:39:28	92.21	2.86	2.74	0:41:04	95.83
14	2.57	2.45	0:36:43	95.25	2.85	2.74	0:41:30	96.04	2.88	2.74	0:41:09	95.28
15	2.55	2.47	0:37:00	96.82	2.97	2.71	0:41:04	91.40	2.87	2.69	0:40:24	93.80

ตารางที่ ข.9(ต่อ) เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากปริมาณฟูมซิลิกาต่างกัน ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	3 %w/v				4 %w/v				5 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
16	2.57	2.51	0:37:38	97.55	2.97	2.78	0:42:07	93.60	2.83	2.74	0:41:09	97.06
17	2.60	2.48	0:37:08	95.23	3.04	2.81	0:42:39	92.60	2.87	2.70	0:40:27	93.87
18	2.58	2.53	0:37:56	98.10	3.08	2.82	0:42:45	91.50	2.82	2.74	0:41:02	96.99
19	2.63	2.52	0:37:46	95.92	3.08	2.82	0:42:46	91.59	2.86	2.73	0:40:58	95.46
20	2.60	2.53	0:37:53	97.04	3.08	2.82	0:42:43	91.52	2.85	2.70	0:40:29	94.73
21	2.62	2.56	0:38:21	97.45	3.07	2.83	0:42:54	92.21	2.82	2.75	0:41:17	97.59
22	2.64	2.55	0:38:14	96.44	2.97	2.67	0:40:31	90.03	2.87	2.71	0:40:34	94.22
23	2.65	2.60	0:38:56	98.11	2.87	2.79	0:42:15	97.28	2.82	2.73	0:40:52	96.70
24	2.69	2.62	0:39:19	97.36	3.00	2.83	0:42:56	94.40	2.85	2.76	0:41:24	97.05
25	2.72	2.63	0:39:29	96.94	3.00	2.67	0:40:25	88.81	2.88	2.79	0:41:53	97.05
26	2.73	2.63	0:39:25	96.33	2.83	2.78	0:42:11	98.34	2.91	2.79	0:41:52	95.85
27	2.71	2.54	0:38:04	93.62	2.98	2.87	0:43:28	96.34	2.91	2.80	0:41:57	96.12
28	2.63	2.59	0:38:51	98.55	3.08	2.87	0:43:30	93.30	2.91	2.79	0:41:51	95.81
29	2.68	2.57	0:38:29	95.78	3.07	2.86	0:43:25	93.17	2.91	2.79	0:41:50	95.91
30	2.65	2.61	0:39:04	98.15	3.07	2.81	0:42:33	91.43	2.91	2.81	0:42:06	96.59
Average	2.57	2.47	0:36:58	96.08	2.93	2.69	0:40:45	92.19	2.82	2.68	0:40:13	95.17

ตารางที่ ข.10 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิ-ไฮดปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.57	2.66	0:39:51	-	1.47	2.39	0:35:50	-
2	2.80	2.55	0:38:19	91.21	2.69	2.37	0:35:33	88.07
3	2.66	2.58	0:38:38	96.95	2.56	2.39	0:35:55	93.41
4	2.66	2.58	0:38:41	96.81	2.55	2.42	0:36:18	94.75
5	2.65	2.65	0:39:47	99.92	2.56	2.47	0:37:03	96.33
6	2.73	2.67	0:40:03	97.73	2.60	2.49	0:37:23	95.74
7	2.73	2.70	0:40:29	98.76	2.60	2.54	0:38:07	97.73
8	2.77	2.76	0:41:28	99.64	2.65	2.59	0:38:47	97.51
9	2.82	2.77	0:41:34	98.16	2.69	2.62	0:39:22	97.58
10	2.82	2.82	0:42:15	99.89	2.73	2.66	0:39:54	97.54
11	2.87	2.80	0:41:57	97.39	2.75	2.66	0:39:58	96.73
12	2.88	2.84	0:42:40	98.78	2.75	2.69	0:40:24	98.11
13	2.90	2.89	0:43:24	99.93	2.78	2.73	0:40:54	98.27
14	2.94	2.85	0:42:42	96.87	2.80	2.72	0:40:51	97.18
15	2.93	2.92	0:43:46	99.62	2.79	2.77	0:41:31	99.07

ตารางที่ ข.10(ต่อ) เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งสารประกอบแอลดิ-ไฮดปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
16	2.96	2.94	0:44:08	99.29	2.84	2.75	0:41:59	96.80
17	2.99	2.84	0:42:34	94.98	2.87	2.72	0:41:25	94.84
18	2.97	2.91	0:43:43	97.98	2.86	2.74	0:41:52	95.90
19	3.08	3.01	0:45:08	97.76	2.85	2.68	0:42:32	94.07
20	3.04	2.94	0:44:07	96.62	2.90	2.70	0:42:22	93.14
21	3.02	3.01	0:45:10	99.70	2.88	2.72	0:42:41	94.51
22	3.05	2.96	0:44:25	97.18	2.91	2.75	0:42:49	94.63
23	3.00	2.97	0:44:31	99.07	2.91	2.74	0:43:00	94.16
24	3.00	3.00	0:45:00	99.87	2.93	2.74	0:43:27	93.58
25	3.04	2.95	0:44:13	97.04	2.96	2.72	0:43:39	91.99
26	3.02	3.00	0:45:00	99.44	2.97	2.70	0:43:48	90.85
27	3.04	2.96	0:44:26	97.43	2.98	2.71	0:43:23	90.97
28	3.02	3.00	0:45:01	99.37	2.94	2.69	0:43:23	91.37
29	3.04	3.01	0:45:07	98.91	2.95	2.59	0:43:53	87.83
30	3.05	3.00	0:45:03	98.59	2.98	2.63	0:43:55	88.06
Average	2.91	2.85	0:42:46	98.10	2.80	2.64	0:40:44	94.51

ตารางที่ ข.11 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งวานิลลินปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	2.02	2.50	0:37:21	-	1.98	2.12	0:31:48	-
2	3.08	2.60	0:39:39	84.50	3.01	2.19	0:32:47	72.83
3	3.06	2.70	0:39:47	88.38	2.99	2.24	0:33:37	75.04
4	3.11	2.60	0:39:10	83.52	3.01	2.31	0:34:41	76.80
5	3.09	2.70	0:40:28	87.41	2.98	2.43	0:36:28	81.46
6	3.03	2.70	0:41:13	89.26	2.91	2.52	0:37:47	86.69
7	2.91	2.54	0:38:02	87.09	2.78	2.46	0:36:54	88.49
8	3.08	2.78	0:41:37	90.19	3.01	2.68	0:40:16	89.26
9	3.06	2.89	0:43:24	94.73	2.99	2.76	0:41:24	92.46
10	3.11	2.91	0:43:40	93.58	3.01	2.78	0:41:46	92.55
11	3.09	2.91	0:43:37	94.17	2.98	2.77	0:41:35	92.93
12	3.03	2.77	0:41:33	91.57	2.91	2.61	0:39:10	89.82
13	2.91	2.70	0:40:37	92.72	2.78	2.50	0:37:33	89.93
14	2.97	2.80	0:41:58	94.15	2.83	2.62	0:39:15	92.55
15	3.02	2.80	0:42:22	92.81	2.94	2.67	0:39:59	90.82

ตารางที่ ข.11(ต่อ) เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณ 4 %w/v และสารเติมแต่งวานิลลินปริมาณต่างๆ ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	0.005 %w/v				0.01 %w/v			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
16	2.95	2.90	0:42:54	98.17	2.96	2.71	0:40:35	91.58
17	2.98	2.90	0:42:58	97.18	2.81	2.73	0:40:59	97.29
18	3.01	2.90	0:43:08	96.44	2.92	2.76	0:41:26	94.52
19	2.95	2.81	0:42:11	95.29	3.01	2.68	0:40:09	89.06
20	2.95	2.90	0:43:28	98.44	2.83	2.77	0:41:31	97.77
21	3.04	2.94	0:44:01	96.55	2.94	2.79	0:41:54	95.00
22	3.07	2.80	0:42:02	91.36	2.96	2.65	0:39:45	89.56
23	2.93	2.90	0:43:25	98.84	2.81	2.76	0:41:23	98.33
24	3.03	2.96	0:44:21	97.79	2.92	2.81	0:42:10	96.27
25	3.10	2.74	0:41:09	88.60	2.98	2.71	0:40:41	90.92
26	2.97	2.84	0:42:37	95.53	3.01	2.79	0:41:50	92.72
27	3.02	2.83	0:42:27	93.80	3.05	2.77	0:41:34	90.82
28	2.95	2.86	0:42:50	96.68	2.97	2.79	0:41:49	94.00
29	2.98	2.88	0:43:15	96.62	2.99	2.80	0:42:02	93.62
30	3.01	2.84	0:42:39	94.55	3.01	2.76	0:41:23	91.78
Average	3.02	2.80	0:41:56	93.10	2.94	2.63	0:39:28	90.17

ตารางที่ ข.12 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง ระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปทางการค้ากับเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัย ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	Commercial				Gel invent			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	1.14	3.48	0:29:51	-	1.26	3.83	0:32:48	-
2	4.37	3.50	0:30:00	80.09	4.45	3.84	0:32:55	86.29
3	4.37	3.58	0:30:40	81.92	4.35	3.91	0:33:29	89.89
4	4.51	3.47	0:29:46	76.94	4.39	3.89	0:33:22	88.61
5	4.36	3.44	0:29:31	78.90	4.35	3.93	0:33:41	90.34
6	4.40	3.52	0:30:10	80.00	4.37	3.98	0:34:06	91.08
7	4.38	3.38	0:29:00	77.17	4.40	3.97	0:34:02	90.23
8	4.33	3.60	0:30:52	83.14	4.40	4.12	0:35:18	93.64
9	4.45	3.43	0:29:22	77.08	4.54	4.02	0:34:25	88.55
10	4.29	3.57	0:30:38	83.22	4.45	4.14	0:35:27	93.03
11	4.47	3.58	0:30:39	80.09	4.57	4.09	0:35:03	89.50
12	4.37	3.30	0:28:15	75.51	4.50	4.06	0:34:46	90.22
13	4.17	3.49	0:29:54	83.69	4.47	4.14	0:35:31	92.62
14	4.33	3.20	0:27:28	73.90	4.54	4.02	0:34:26	88.55
15	3.99	3.28	0:28:06	82.21	4.41	4.10	0:35:07	92.97

ตารางที่ ข.12(ต่อ) เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของเจลแบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง ระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปทางการค้ากับเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัย ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

Number of cycles	Commercial				Gel invent			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
16	4.12	3.39	0:29:04	82.28	4.50	4.10	0:35:10	91.11
17	4.18	2.93	0:25:06	70.10	4.48	4.08	0:34:57	91.07
18	3.12	2.89	0:24:45	92.63	4.36	4.00	0:34:19	91.74
19	3.00	2.84	0:24:20	94.67	4.27	4.13	0:35:23	96.72
20	2.95	2.94	0:25:13	99.66	4.33	4.10	0:35:09	94.69
21	3.06	2.94	0:25:11	96.08	4.28	4.12	0:35:20	96.26
22	3.06	2.93	0:25:07	95.75	4.31	4.11	0:35:12	95.36
23	3.05	2.92	0:25:02	95.74	4.28	4.08	0:35:00	95.33
24	3.04	2.90	0:24:50	95.39	4.25	4.14	0:35:31	97.41
25	3.01	2.89	0:24:49	96.01	4.31	4.08	0:35:00	94.66
26	3.01	2.88	0:24:39	95.68	4.24	4.07	0:34:56	95.99
27	2.99	2.84	0:24:22	94.98	4.24	4.09	0:35:02	96.46
28	2.96	2.84	0:24:20	95.95	4.25	4.07	0:34:51	95.76
29	3.04	2.90	0:24:50	95.39	4.23	4.05	0:34:45	95.74
30	3.01	2.89	0:24:49	96.01	4.21	4.03	0:34:32	95.72
Average	3.74	3.19	0:27:21	86.56	4.37	4.04	0:34:39	92.74

ตารางที่ ข.13 เปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ที่ระยะเวลาในการเก็บต่างๆ ของแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเหลวและที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะของเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ

Storage time (weeks)	Liquid battery				Gel battery					
	H_2SO_4		H_2SO_4 + Na_2SO_4 (0 %w/v si)		3 %w/v si		4 %w/v si		5 %w/v si	
	Voltage (V)	Remaining capacity (%Ah)	Voltage (V)	Remaining capacity (%Ah)	Voltage (V)	Remaining capacity (%Ah)	Voltage (V)	Remaining capacity (%Ah)	Voltage (V)	Remaining capacity (%Ah)
0	13.28	100.0	13.23	100.0	13.15	100.0	13.15	100.0	13.17	100.0
1	12.92	96.0	12.87	93.5	13.00	100.0	13.09	100.0	13.10	100.0
2	12.85	92.5	12.86	93.0	12.97	98.5	13.06	100.0	13.06	100.0
3	12.83	91.5	12.85	92.5	12.96	98.0	13.04	100.0	13.04	100.0
4	12.82	91.0	12.84	92.0	12.95	97.5	13.02	100.0	13.02	100.0
5	12.80	90.0	12.83	91.5	12.95	97.5	13.00	100.0	12.99	99.5
6	12.80	90.0	12.83	91.5	12.93	96.5	12.99	99.5	12.98	99.0
7	12.78	88.6	12.81	90.5	12.92	96.0	12.97	98.5	12.96	98.0
8	12.78	88.6	12.80	90.0	12.91	95.5	12.95	97.5	12.94	97.0
9	12.77	88.0	12.79	89.3	12.90	95.0	12.93	96.5	12.92	96.0
10	12.75	86.6	12.78	88.6	12.89	94.5	12.92	96.0	12.92	96.0
11	12.75	86.6	12.77	88.0	12.88	94.0	12.89	94.5	12.89	94.5
12	12.73	85.3	12.77	88.0	12.87	93.5	12.87	93.5	12.86	93.0

ตารางที่ ข.14 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) หลังการเก็บ 3 เดือน

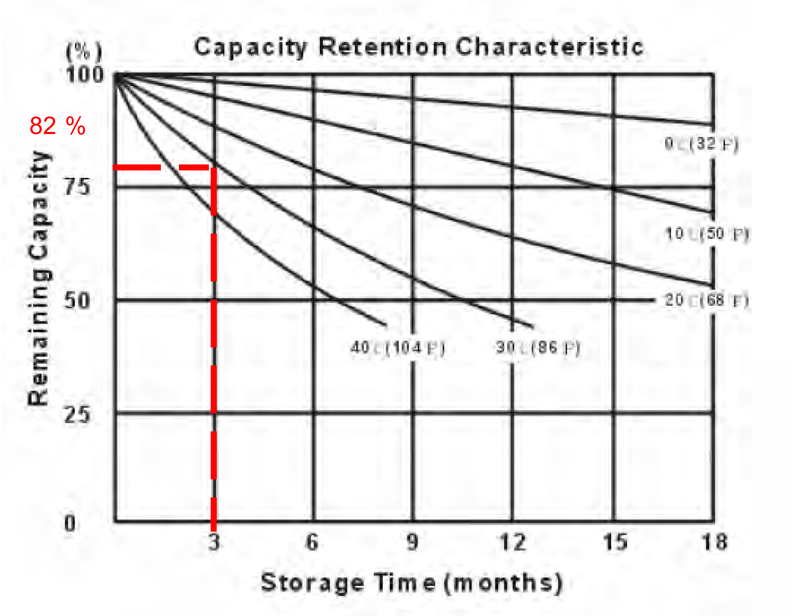
Number of cycles	H_2SO_4				H_2SO_4 + Na_2SO_4 (0 %w/v si)			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	-	3.21	7:56:26	-	-	3.64	9:03:05	-
2	3.68	3.20	7:54:50	86.91	3.88	3.56	8:50:55	91.83
3	3.50	3.16	7:48:08	90.25	3.64	3.45	8:34:10	94.76
4	3.41	3.18	7:51:34	93.20	3.61	3.40	8:26:30	94.26
5	3.43	3.19	7:52:52	93.02	3.48	3.31	8:13:12	95.01
6	3.51	3.15	7:41:37	89.85	3.33	3.31	8:13:17	99.55
7	3.44				3.48			
Average	3.49	3.18	7:50:54	90.64	3.57	3.45	8:33:32	95.08

ตารางที่ ข.15 เปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ของแบตเตอรี่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเจลที่เตรียมจากฟูมซิลิกาปริมาณต่างๆ ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง ภายใต้การทดสอบแบบอัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) หลังการเก็บ 3 เดือน

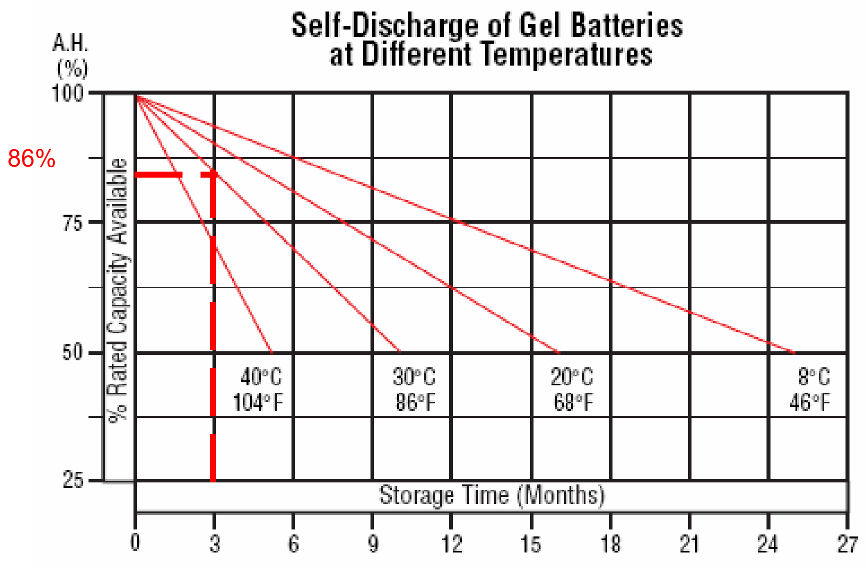
Number of cycles	3 %w/v si				4 %w/vsi				5 %w/vsi			
	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)	Charge capacity (Ah)	Discharge capacity (Ah)	Discharge time (hr:min:sec)	Efficiency (%)
1	-	4.25	10:32:22	-	-	3.73	9:15:38	-	-	3.85	9:31:54	-
2	4.75	4.37	10:50:46	91.94	4.10	3.99	9:53:01	97.27	4.47	4.10	10:10:53	91.83
3	4.54	4.40	10:54:29	96.87	4.29	4.04	10:00:23	94.10	4.47	4.18	10:22:58	93.56
4	4.54	4.43	10:58:52	97.45	4.17	4.04	10:00:23	96.79	4.45	4.19	10:23:14	93.96
5	4.65	4.35	10:47:10	93.45	4.19	4.04	10:01:25	96.38	4.50	4.19	10:23:49	93.01
6	4.51	4.39	10:53:23	97.40	4.13	4.06	10:03:26	98.16	4.53	4.22	10:27:48	93.09
7	4.51				4.17				4.40			
Average	4.58	4.36	10:49:30	95.42	4.17	3.98	9:52:23	96.54	4.47	4.12	10:13:26	93.09

ภาคผนวก ค

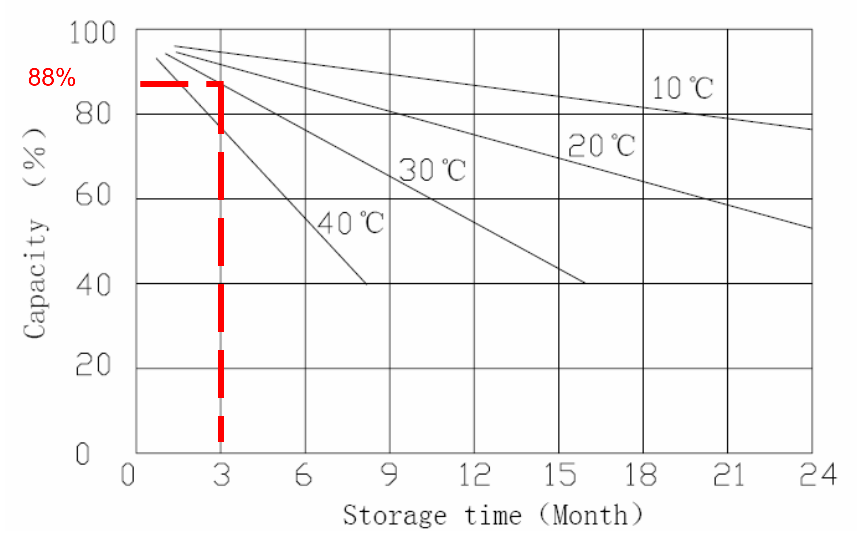
คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบและที่ใช้ทางการค้า



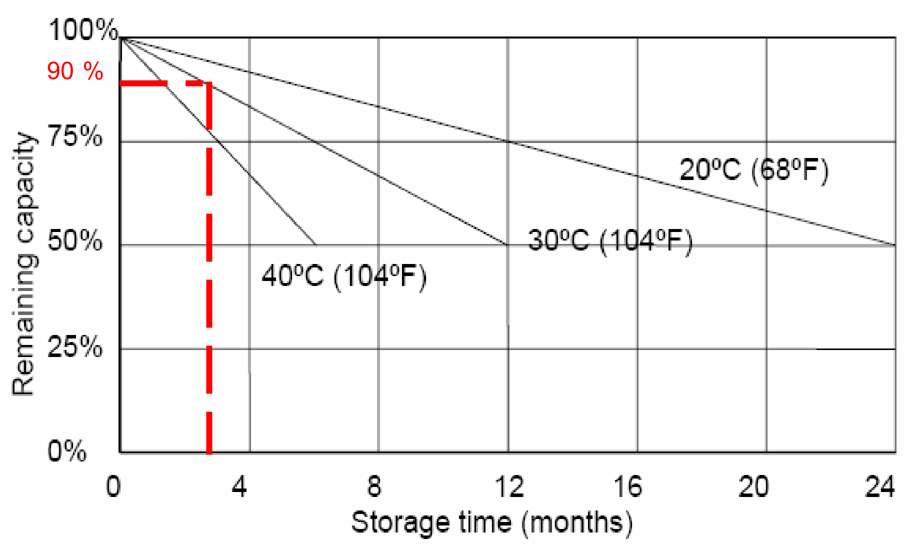
รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท Kung Long Batteries Industrial [31]



รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท MK battery [33]



รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท Narada Power Source [34]

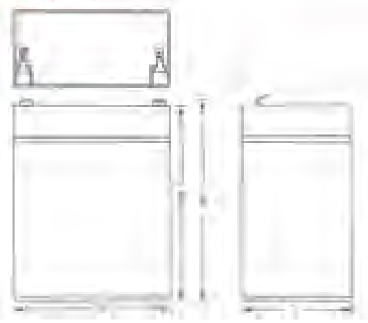


รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของเจลแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บของบริษัท MASTERVOLT [35]

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

LION®

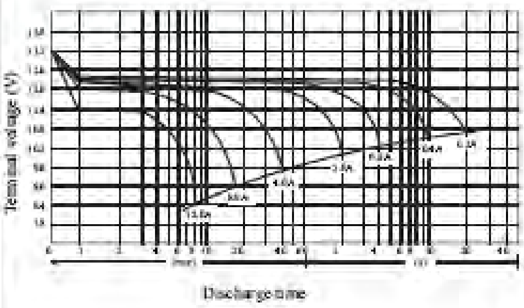
Dimensions (mm)



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

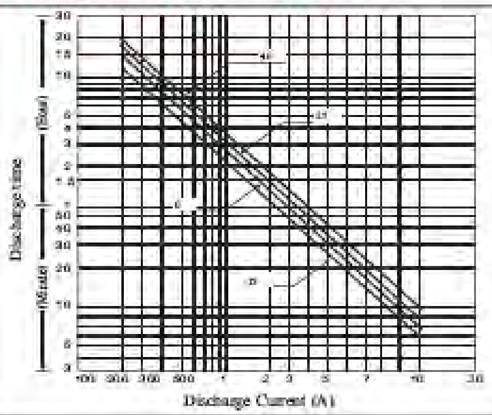


Characteristics

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

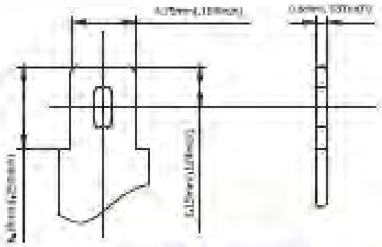
12V7.2AH

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 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



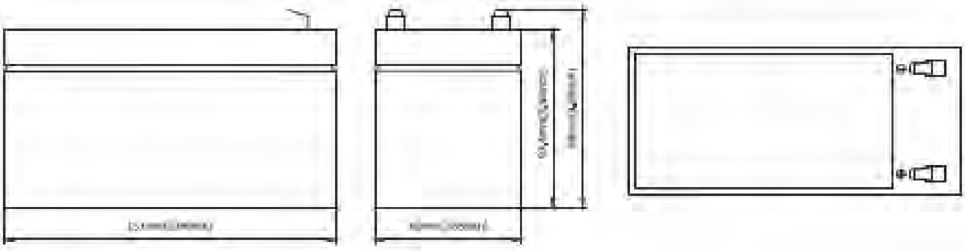
Terminal Dimensions

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.

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



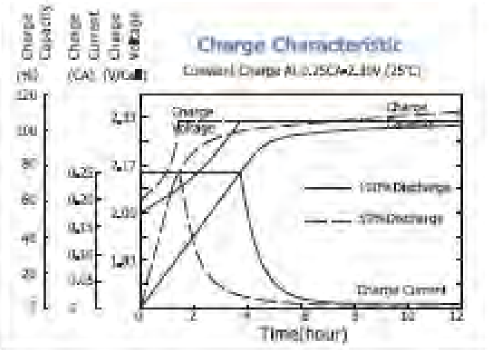
Battery Model	GT7.2-12 (MP7.2-12V)			
Designed Life	8 Years (Floating) or > 750 Cycles @ 50% D.O.D			
Capacity(25℃)		10HR(0.7A,1.75V)	5HR(1.23A,1.75V)	1HR(4.68A,1.75V)
	7. 2AH	7AH	6. 15AH	4.68AH
Dimensions	Length	Width	Height	Total Height
	151mm(5.94inch)	65mm(2.56inch)	93.4mm(3.68inch)	99mm(3.90inch)
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/ ℃)	

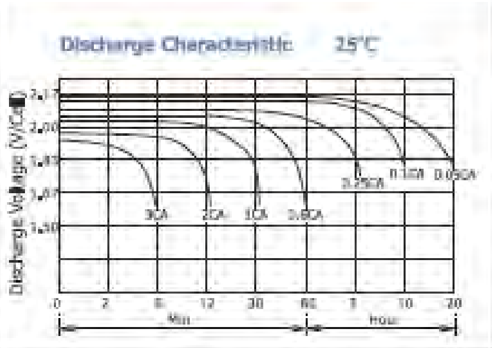
LION®

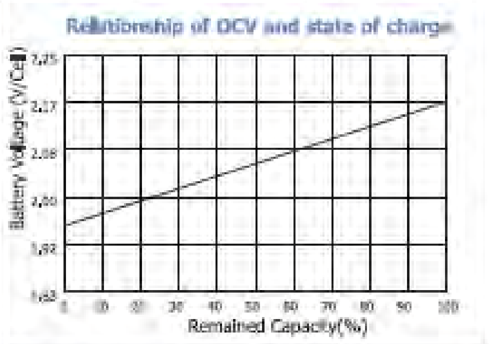
SLA BATTERY

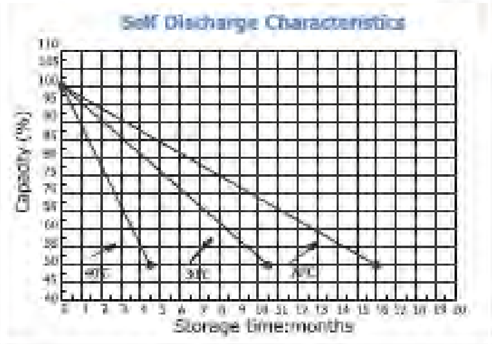
GT7.2-12

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

CE UL

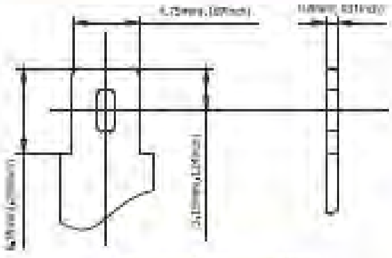
LION®

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 fils to the batteries with vacuum to ensure the fully penetration of electrolyte through separators and plates pastes.

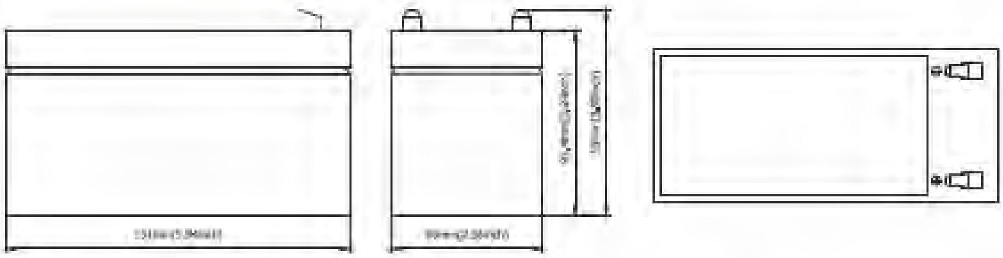
Application
- Alarm System
- Cable Television
- Communication Equipment
- Control Equipment
- Security System
- Medical Equipment
- UPS
- Power tools
- Emergency Power System
- Toys

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 ......EPDM
- 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

นางสาวฐิติพร ตันติชนะกุล เกิดวันที่ 21 กันยายน 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551