



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“การพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว”

โดย

รศ.ดร.อรรณพ ชัยลภากุล และคณะ

สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๔

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว”

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. รศ.ดร. อรรพรรณ ชัยลภากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ดร. นิสิต ตันทวิเชฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ดร. วิณา เสียงเพราะ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สัญญาเลขที่ IUG5280002

โครงการ “การพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว”

รายงานฉบับสมบูรณ์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 31 สิงหาคม 2552

ถึงวันที่ 31 สิงหาคม 2554

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน: รศ.ดร.อรรณณ ชัยลภากุล

หน่วยงาน : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การดำเนินงาน : ☒ ได้ดำเนินงานตามแผนงานที่วางไว้ทุกประการ
☐ ได้เปลี่ยนแปลงแผนงานที่วางไว้ดังนี้คือ

ในรอบ 2 ปี ที่ผ่านมาท่านได้

- ☒ ติดต่อทางโทรศัพท์/โทรสาร กับผู้ร่วมทุน 76 ครั้ง
- ☒ ประชุมร่วมกับผู้ร่วมทุน ...15... ครั้ง เมื่อวันที่.....
- ☒ ประชุมทีมวิจัย ..30... ครั้ง เป็นเรื่อง ☒ ทบทวน/☒ วางแผนงาน..10...ครั้ง
- ☒ หาหรือปัญหาการทำงานวิจัย ..15... ครั้ง
- ☒ วิเคราะห์ผล.....15...ครั้ง
- ☒ มอบหมายงาน...10...ครั้ง
- ☒ การจัดหาจัดจ้าง..5..ครั้ง

บทคัดย่อ

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการ “การพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว -กรดแบบวาล์ว” นี้ได้ ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่ง ปริมาณพุ่มซิลิกา ขนาดพุ่มซิลิกาในเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว - กรดแบบมีวาล์วควบคุม ซึ่งจะแบ่งการทดลองเป็นสองส่วนคือส่วนที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ผสมสารเติมแต่งต่างๆ ได้แก่ พอลิพี โรล (PPy) พอลิเอทิลีนไดออกไซด์/พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PEDOT:PSS) พอนโซ เอสเอส (Pss) ของเหลวไอออนิก (IL) ทำการวัด ค่าการนำไฟฟ้า การสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี และทดสอบ ประสิทธิภาพแบตเตอรี่ตะกั่ว -กรดแบบมีวาล์วควบคุมที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่พัฒนาขึ้น พบว่า การวัดค่าการนำไฟฟ้าใน นั้น สามารถบอกแนวโน้มของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมได้ แต่ไม่สามารถบ่งบอกถึงสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมได้ โดยใน การวัดค่าการนำไฟฟ้าในนั้นยังต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ควบคู่ด้วยเพื่อให้ผลการทดลองที่แน่นอน โดย เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าที่สูงกว่าการไม่เติมสารเติมแต่ง ได้แก่ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติม แต่ง พอลิพีโรลและ พอนโซ เอสเอส ส่วนเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งของเหลวไอออนิก จะช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน และออกซิเจนได้ ขณะที่การทดลองอีกส่วนจะใช้ไซเคิลผสมผสานกับสารเติมแต่งต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาผลในอิเล็กโทรไลต์ เหลว พบว่า ไซเคิลผสมผสาน ช่วยเพิ่มสมรรถนะของแบตเตอรี่ โดยให้ค่าความจุมากขึ้นร้อยละ 6.85 และมีประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น ร้อยละ 2.35 เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมไซเคิลผสมผสาน ดังนั้นในส่วนของเจลอิเล็กโทรไลต์จึงเตรียมจากพุ่มซิลิกา กรด ซัลฟิวริก สารเติมแต่งไซเคิลผสมผสานและสารเติมแต่งต่างๆ ได้แก่ สารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลลิน พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิ แอคริลาไมด์ และพอลิพีโรล จากการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลและความแข็งแรงของเจล พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกา สารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลลินและพอลิแอคริลาไมด์ ส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลงและทำให้ความแข็งแรงของเจล เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและ ออกซิเจน และการเพิ่มปริมาณสารประกอบแอลดีไฮด์และวานิลลินจะช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจนได้ มากขึ้น ผลการทดสอบสมรรถนะในแบตเตอรี่ขนาด 4 แอมป์แอมป์-ชั่วโมง ภายใต้สภาวะการใช้งานจนคายประจุหมด (100% Depth of Discharge, DoD) พบว่าเมื่อไม่เติมสารเติมแต่งเจลแบตเตอรี่จะให้ค่าความจุโดยรวมสูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ ในสภาวะเหลว โดยเจลที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา 5% w/v จะให้แนวโน้มค่าความจุมากที่สุด และเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งพบว่าเจล ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา 4% w/v และ สารประกอบแอลดีไฮด์ 0.005 %w/v ให้แนวโน้มค่าความจุที่อัตราการคายประจุสูงกว่าเจล แบตเตอรี่ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา 5% w/v ร้อยละ 6.34 โดยให้ค่าความจุในการคายประจุที่อัตราต่ำใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยัง พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ให้ค่าสมรรถนะสูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปในทางการค้าเมื่อทดสอบใน แบตเตอรี่ขนาด 7 แอมป์แอมป์-ชั่วโมง และยังพบว่าเจลแบตเตอรี่มีอัตราการคายประจุด้วยตัวเอง (self discharge) ช้ากว่าแบตเตอรี่ ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะเหลว โดยหลังเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือน เจลแบตเตอรี่มีความจุที่เหลืออยู่ร้อยละ 93 ซึ่งสูงกว่า แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะของเหลวประมาณร้อยละ 6 โดยที่เมื่อตรวจสอบผิวหน้าของแผ่นธาตุลบของแบตเตอรี่ (แผ่นธาตุตะกั่ว) ด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า สารเติมแต่งไม่เกิดปฏิกิริยาต่อผิวหน้าแผ่นธาตุตะกั่ว แต่จะส่งผลต่อลักษณะการเกิดของผลึกซัลเฟตที่แตกต่างกัน ซึ่งเจลแบตเตอรี่ที่พัฒนาขึ้นนั้นยังสามารถใช้ งานที่อุณหภูมิสูงได้ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ได้อย่างดี

Abstract

This final report of “Development of gelled electrolyte for valve-regulated lead-acid battery” project studied the effects of additives, fumed silica content and fumed silica particle sizes in gel electrolyte on performance of valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries. The experimental divide two parts. First investigate the conductivity, hydrogen-oxygen evolution by cyclic voltammetry and battery’s performance of gel electrolyte mixed with additive i.e. Polypyrrole doped composite with carbon black (PPy), Poly(ethylenedioxythiophene)/Poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS), Ponceau SS (Pss) and ionic liquid (IL). The results exhibited that the conductivity advise the tendency of proper gel electrolytes, also it could unidentified the best formulation of gel electrolyte. For certainty, the performance of battery and conductivity measurement was tested concurrently. The gel electrolyte with mixed of PPy and mixed Pss provide high conductivity and capacity. For gel electrolyte with mixed of IL can reduce the hydrogen-oxygen evolution. Second part shows investigation of gel electrolyte with mixed sodium sulfate and additives. 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. When the negative plates of battery (Pb) were analyzed by scanning electron microscopy technique, it found that the additives had no reaction on the surface of lead plate but they caused the different lead sulfate crystals on the surface. The gel invented battery can operate at high temperature and apply to electrical equipments with good performance.

เอกสารแนบท้ายสัญญา

โครงการการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม

Executive Summary

1. ชื่อโครงการ

การพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว (Development of gelled electrolyte for valve-regulated lead-acid battery)

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัญหาจากการใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ในปัจจุบัน พบว่าอิเล็กโทรไลต์ประเภทกรดซัลฟิวริกและน้ำจะสามารถเกิดการรั่วไหลได้ง่าย และเมื่อเกิดการอัดประจุเกิน (overcharge) จะทำให้แผ่นลบเกิดก๊าซไฮโดรเจนและแผ่นบวกเกิดก๊าซออกซิเจน ผลที่ตามมาคือเกิดการสูญเสียน้ำ ทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาแบตเตอรี่โดยการเติมน้ำอยู่เป็นประจำ ต่อมาจึงมีการพัฒนาเป็น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว (Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Battery) ใช้หลักการการตรึงอิเล็กโทรไลต์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ;(1) Absorptive Glass-Mat (AGM) separator คือการตรึงอิเล็กโทรไลต์บนวัสดุที่มีรูพรุน และ (2) Gelled Electrolyte (GEL) คือการผสม gelling agent กับสารละลายกรดซัลฟิวริก ข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว คือ (1) ลดการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ออกจากภาชนะบรรจุ (2) ลดการสูญเสียน้ำ และ(3) ลดการบำรุงรักษา

ข้อแตกต่างระหว่าง AGM และ GEL คือ แบบ GELจะเป็น แบตเตอรี่ ที่แห้งกว่าแบบ AGM ถ้าเปลี่ยนนอกของแบตเตอรี่แต่จะไม่มีกรร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ แต่สำหรับแบบ AGM อิเล็กโทรไลต์ยังคงอยู่ในสถานะของเหลวฉะนั้นหากเปลี่ยนนอกของแบตเตอรี่แต่จะยังกรร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ออกจากแบตเตอรี่ จึงส่งผลให้เกิดปัญหาด้านการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้แบตเตอรี่แบบ AGM มีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่แบบ GEL นอกจากนี้ยังพบว่าแบตเตอรี่แบบ GEL มีอายุก่อนการใช้งาน (shelf life) ยาวนานกว่าแบตเตอรี่แบบ AGM อีกด้วย

ปัญหาของการศึกษาเบื้องต้น คณะผู้วิจัยพบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่พัฒนาขึ้นนั้นถึงแม้ว่าจะมีความสามารถในการคายประจุ (discharge capacity) อยู่ในเกณฑ์ดีเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด ปกติ (2.3 แอมป์ชั่วโมง ที่อัตราการคายประจุ 1 ชั่วโมง) แต่กลับมีค่า โวลต์เริ่มต้นก่อนจะทำการคายประจุต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด (ประมาณ 13.2 โวลต์) โดยค่าที่ทำการทดสอบได้อยู่ในช่วง 12.60 – 12.65 โวลต์ ซึ่งยังไม่เป็นที่ยอมรับในทางอุตสาหกรรม ผู้วิจัยจึงมุ่งหมายที่จะพัฒนาเจลอิเล็กโทรไลต์ให้มีสมรรถภาพดียิ่งขึ้น โดยเริ่มจาก การปรับปรุงเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมจากการศึกษาเบื้องต้นเพื่อให้ได้แบตเตอรี่ที่มีความสามารถในการคายประจุที่ดีขึ้น และได้โวลต์เริ่มต้นก่อนการคายประจุที่มีประสิทธิภาพดี เป็นเป็นที่ยอมรับและใช้ได้จริงในทางอุตสาหกรรมและสามารถเป็นต้นแบบในการผลิตแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรดแบบเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับการผลิตแบตเตอรี่ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์ชนิดเจลที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและการก่อตัวเป็นเจลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว และเหมาะสมต่อกลุ่มประเทศที่มีลักษณะอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วย

1.2.2 เพื่อศึกษาการบรรจุอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมลงในเซลล์แบตเตอรี่ให้ยังมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการบรรจุจริงในอุตสาหกรรม

1.2.3 เพื่อหาค่าประกอบที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ที่มีประสิทธิภาพโดยการทดสอบประสิทธิภาพของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น

1.2.4 เพื่อนำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้มาพัฒนาใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว -กรด เพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว -กรดแบบวาล์วที่มีอิเล็กโทรไลต์ชนิดเจลในโรงงานต่อไป

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

1.3.1 ปรับปรุงสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ใหม่ควบคู่กับการศึกษาหาความรู้เพิ่มเติม เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมีโดยรวม ความรู้ทางด้านแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดทั้งที่อิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาพของเหลวและเจล รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 หาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ ชนิดของ gelling agent ปริมาณ gelling agent ปริมาณกรดซัลฟิวริก ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่เหมาะสม รวมถึงอัตราเร็ว เทคนิค เวลา และอุณหภูมิในการผสมที่เหมาะสมอีกด้วย เป็นต้น

1.3.3 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น ได้แก่ ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค *Scanning electron microscopy (SEM)* ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เวลาในการเกิดเจล (gelling time) ค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารวมตัวของออกซิเจน และปฏิกิริยาพื้นฐานในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ด้วยเทคนิคทางไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นต้น

1.3.4 ศึกษาหาเทคนิคการบรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุด เช่น จำนวนครั้งในการบรรจุแบตเตอรี่ต่อ 1 ลูก อุณหภูมิขณะบรรจุ การชุบแผ่นขั้วไฟฟ้าก่อนการบรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ รวมถึง gel formation time เป็นต้น

1.3.5 ทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว ที่บรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น โดยอ้างอิง Parameters จากมาตรฐาน JIS C 8702-1:2003 “Small-sized valve regulated lead-acid batteries—Part 1: General requirements, functional characteristics—Method of test” และ IEC 61056-1:1991 “Portable lead-acid cells and batteries (Valve-regulated types)—Part 1: General requirements, functional characteristics—Methods of test” สำหรับใช้ในการทดสอบหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น Capacity, High rate discharge characteristic, Cycle life, Shelf life และ Gas recombining characteristic เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึง การนำแบตเตอรี่ชนิดเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ทำขึ้นได้ไปทดสอบใช้จริง เช่น ใช้ในไฟกระพริบที่ใช้ในจราจร แบบระบบทำงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงานปีที่ 1												ระยะเวลาดำเนินงานปีที่ 2												ผู้รับผิดชอบ	ผลที่จะได้ (output)					
	ไตรมาสที่ 1			ไตรมาสที่ 2			ไตรมาสที่ 3			ไตรมาสที่ 4			ไตรมาสที่ 1			ไตรมาสที่ 2			ไตรมาสที่ 3			ไตรมาสที่ 4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12							
1. คิดค้นสูตรและเทคโนโลยีเจอลีเล็กโทรไลต์ใหม่ ควบคู่กับการศึกษาหาความรู้เพิ่มเติม																													รศ.ดร. อรรพพร, ดร. นิสิต, ดร. วิภา และน.ส.อมรรัตน์		
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจอลีเล็กโทรไลต์																														รศ.ดร. อรรพพร, ดร. นิสิต, ดร. วิภา และน.ส.อมรรัตน์	ได้ภาวะการเตรียมเจอลีเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม เช่น ความเร็ว เวลา อุณหภูมิ เป็นต้น
3. ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเจอลีเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น																														รศ.ดร. อรรพพร, ดร. นิสิต, ดร. วิภา และน.ส.อมรรัตน์	
4. ศึกษาหาเทคนิคการบรรจุเจอลีเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุด																														รศ.ดร. อรรพพร, ดร. นิสิต, ดร. วิภา และน.ส.อมรรัตน์	ได้เทคนิคที่เหมาะสมต่อการบรรจุเจอลีเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่
5. ทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว ที่บรรจุเจอลีเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น																										รศ.ดร. อรรพพร, ดร. นิสิต, ดร. วิภา, น.ส.อมรรัตน์ และคุณกฤษฎณ์	ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้				
5.1 ทดสอบความสามารถในการอัดประจุและคายประจุ																										รศ.ดร. อรรพพร, ดร. นิสิต, ดร. วิภา และน.ส.อมรรัตน์	จดสิทธิบัตรจำนวน 1 เรื่อง				
5.2 นำแบตเตอรี่ที่ทำขึ้นได้ไปทดสอบใช้จริง																										รศ.ดร. อรรพพร, ดร. นิสิต, ดร. วิภา, น.ส.อมรรัตน์ และคุณกฤษฎณ์	นำแบตเตอรี่ไปทดสอบใช้จริง รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้ และ จดสิทธิบัตรจำนวน 1 เรื่อง				

1.5 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (ผลงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และ/หรือผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติโดยระบุทั้งชื่อวารสารและชื่อเรื่องที่คาดและค่า impact factor ของวารสาร

ผลผลิตเมื่อสิ้นสุดปีที่ 1 คือ...ได้เจลอิลิกโทรไลต์ที่มีคุณลักษณะและสมบัติที่ดีและเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในแบตเตอรี่ และจดสิทธิบัตรจำนวน 1 สิทธิบัตร.....

ผลผลิตเมื่อสิ้นสุดปีที่ 2 คือ...จดสิทธิบัตรในประเทศจำนวน 2 สิทธิบัตรและ ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ Journal of Power Sources จำนวน 1 วารสาร Impact Factor 4.283 ซึ่งจะสามารถดำเนินการได้หลังจากจดสิทธิบัตรแล้ว.....

***เนื่องจากการทดสอบแบตเตอรี่จะใช้เวลานานในการทดสอบให้สมบูรณ์พร้อมใช้งานได้จริง จึงไม่สามารถจดสิทธิบัตรในประเทศจำนวน 3 สิทธิบัตรได้ในระยะเวลา 3 ปี แต่ทางผู้วิจัยจะพยายามสุดความสามารถเพื่อให้ได้จดสิทธิบัตรในประเทศจำนวนทั้งสิ้น 3 สิทธิบัตร

***เนื่องจากการทดสอบแบตเตอรี่จะใช้เวลานานในการทดสอบให้สมบูรณ์พร้อมใช้งานได้จริง จึงไม่สามารถตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติจำนวน 3 วารสารได้ในระยะเวลา 2 ปี อีกทั้งการตีพิมพ์ในวารสารนั้นจะกระทำได้หลังจากที่จดสิทธิบัตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
Executive Summary.....	ค
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทนำ.....	1
1. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery).....	1
1.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	1
1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	2
1.2.1 การอัดและการคายประจุ (Charging and discharging).....	4
1.2.2 ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Capacity of battery)	5
1.2.3 อัตราการคายประจุ และอัตราการอัดประจุ.....	6
2. ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด.....	8
2.1. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบอิเล็กโทรไลต์เหลวหรือแบตเตอรี่แบบเปียก (Flooded battery or Wet cell battery)	8
2.2. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม (Valve-regulated lead-acid battery).....	9
3. เคมีของเจล (Gel chemistry)	10

หน้า

วัตถุประสงค์.....	12
การทดลอง.....	12
1. การทดสอบคุณสมบัติของอิเล็กโทรไลต์.....	12
1.1 การทดสอบระยะเวลาการเกิดเจล (Gelling time)	12
1.2 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้า.....	14
1.3 การวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	15
2. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่.....	19
2.1 การทดสอบอัตราการคายประจุต่ำ (Low-rate discharge, 10 hr rate)	20
2.2 การทดสอบอัตราการคายประจุสูง (High-rate discharge, 1 hr rate)	21
2.3 การทดสอบอัตราการคายประจุสูง (High-rate discharge, 1 hr rate) แบบ manual.....	22
2.3.1 ขั้นตอนในการทดสอบแบตเตอรี่อัตราการคายประจุสูงแบบ manual.....	22
2.4 การใช้งานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	23
2.5 การทดสอบอายุการใช้งาน.....	24
2.6 การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง.....	25
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	27
1. การศึกษาผลของสารเติมแต่งซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์เหลว.....	27
2. ผลการศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นโดยปราศจากสารเติมแต่งและผลของสารเติมแต่งที่เติมลงใน เจลอิเล็กโทรไลต์.....	31
2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์.....	31
2.1.1 ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล.....	31

หน้า

2.1.2 ผลการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์สูตรต่างๆที่เตรียมขึ้นด้วยการวัดค่าการนำไฟฟ้า.....	42
2.1.3 ผลการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	46
3. ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่.....	64
3.1 ผลของปริมาณฟุ่มซิเลียที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่.....	65
3.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่.....	68
3.2.1 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่โดยใช้เครื่องทดสอบ.....	68
3.2.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่โดยใช้การทดสอบแบตเตอรี่แบบ manual.....	77
3.2.3 การใช้งานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	89
3.2.4 การทดสอบอายุการใช้งาน.....	93
3.2.5 ผลการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง.....	96
3.2.6 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ในอุปกรณ์ไฟกระพริบ (สำหรับการใช้งานจริง).....	101
สรุปผลการทดลอง.....	103
รายการอ้างอิง.....	104
Output.....	106
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก สิ่งตีพิมพ์ในการประชุม (Proceedings).....	108
ภาคผนวก ข วารสารตีพิมพ์ทางวิชาการ.....	112

หน้า

ภาคผนวก ค สิทธิบัตร.....	118
ภาคผนวก ง เอกสารโฆษณา.....	160

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อิเล็กโทรไลต์เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ ที่อัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที.....	15
2	อิเล็กโทรไลต์เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ ที่อัตราเร็ว 2000 รอบต่อนาที สำหรับนำมาทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	17
3	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง.....	20
4	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดของเหลวและเจล (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง.....	21
5	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดเจล (12 V/4Ah) ด้วยการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง.....	23
6	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดของเหลวและเจล (12 V/4Ah) ด้วยการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	23
7	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดเจล (12 V/4Ah) ด้วยการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	24
8	ขั้นตอนการทดสอบสำหรับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าและที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง	24
9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่.....	26
10	ขั้นตอนการทดสอบหลังการเก็บรักษาเพื่อทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง.....	26
11	สรุประยะเวลา (ชั่วโมง:นาที) ในการเกิดเจล.....	41
12	ค่าเฉลี่ยของค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์สูตรต่างๆ ที่ปริมาณพื้มซิลิกาที่ต่างกัน	44
13	ค่าเฉลี่ยของค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ปริมาณความเข้มข้นสารเติมแต่งที่ต่างกัน.....	45
14	สรุปค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย.....	76

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด.....	1
2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	4
3	ลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 100 แอมป์แปร์-ชั่วโมง ในช่วงเวลาที่ เกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ.....	5
4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการคายประจุ จุดสิ้นสุดของค่าความต่างศักย์ที่อัตราเร็วในการ คายประจุต่าง ๆ สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดไม่ต้องการการบำรุงรักษา	6
5	ปฏิกิริยาการคายและการอัดประจุภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ก) ปฏิกิริยาการคายประจุไฟฟ้า ข) ปฏิกิริยาการอัดประจุไฟฟ้า.....	8
6	ผลการวิเคราะห์มวลล่องประกอบเจลแบตเตอรี่เทียบกับแบตเตอรี่แบบเปียก.....	9
7	ขั้นตอนการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาค.....	11
8	ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างของเจลและการผันกลับของโครงสร้างเจลด้วยพันธะไฮโดรเจน.....	11
9	ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจล.....	14
10	แผนภาพการทดสอบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	16
11	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (ก) พื้นผิว ขั้วไฟฟ้าทำงานเมื่อขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ (ข) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทร ไลต์.....	18
12	แสดง ก) เครื่อง Potentio stat/Galvan stat รุ่น PGSTA30 ของบริษัท AUTOLAB ข) หน้าต่าง โปรแกรม GPES ของเครื่อง Potentiostat/Galvan stat	19
13	เครื่องทดสอบแบตเตอรี่UBA 4 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุต่ำ (อัตราการคายประจุ 10 ชั่วโมง)	20
14	เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุสูง (อัตราการคายประจุ 1 ชั่วโมง)	21
	แสดงการอัดประจุ (charge) และการคายประจุ (discharge) แบบ manual.....	22
15	แบตเตอรี่ที่ทดสอบอายุการใช้งาน ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ประกอบด้วย ก) เจล	
16	แบตเตอรี่ที่ใช้ตามท้องตลาด, ข) แบตเตอรี่แบบน้ำที่ใช้ตามท้องตลาด และ ค) แบตเตอรี่เจลที่ พัฒนาขึ้น.....	25

ภาพที่		หน้า
17	ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้า อ้างอิงเปรียบเทียบกรดซัลฟูริกที่ไม่เติมและเติมโซเดียมซัลเฟตช่วง ก) -2.5 V ถึง 3.0 V ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก.....	28
18	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต แบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร และแบตเตอรี่ที่ใช้ในการค้า ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุชั่วโมง	
19	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟุ้งซิลิกา ต่างๆ.....	30
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลที่ปริมาณฟุ้งซิลิกาต่างๆ.....	32
21	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก ต่างๆ.....	32
22	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ความเข้มข้นโซเดียมซัลเฟต ต่างๆ.....	33
23	ความสัมพันธ์ของเวลาในการเกิดเจลที่ความเร็วรอบในการกวนต่างๆ.....	34
24	ความสัมพันธ์ของเวลาในการเกิดเจลที่เวลาในการกวนต่างๆ.....	35
25	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟุ้งซิลิกา 5 %w/v สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ 0.5 %w/v.....	36
26	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟุ้งซิลิกา 4 %w/v ที่ ปริมาณสารเติมแต่งต่างๆ ก) วานิลลิน ข) สารประกอบแอลดีไฮด์.....	37
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลของสารเติมแต่ง วานิลลินและสารประกอบแอลดีไฮด์ที่ ปริมาณต่าง ๆ.....	38
28	เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 3 %w/v สารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์ 0.03 %w/v ก) ด้านบน ข) ด้านข้าง.....	39
29	ผลของค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละสูตรที่ปริมาณฟุ้งซิลิกาต่างๆ ทั้งฟุ้งซิลิกากขนาด 7 นาโนเมตร (A300) และ 12 นาโนเมตร (A200); ก.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง , ข.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง PPy, ค.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS, ง.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง Pss, จ.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง IL, ฉ.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติม สารเติมแต่ง PPy+IL ข.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง Pss+IL.....	40
		43

ภาพที่	หน้า
30	ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ก) เปรียบเทียบปริมาณฟลูมซิลิกาต่างๆช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก..... 48
31	ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต ต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟลูมซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก..... 50
32	ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณพอลิพีร์โรลต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟลูมซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก..... 51
33	ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อมีการเติมสารประกอบแอลคิลไฮด์ปริมาณต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟลูมซิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก..... 53
34	ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อมีการเติมสารประกอบแอลคิลไฮด์ปริมาณต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟลูมซิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่าง ศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก..... 54
35	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นฟลูมซิลิกาต่างๆ..... 55
36	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นฟลูมซิลิกาต่างๆ..... 56
37	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นฟลูมซิลิกาต่างๆ..... 56
38	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PSS ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นฟลูมซิลิกาต่างๆ..... 57
39	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นฟลูมซิลิกาต่างๆ..... 58

ภาพที่	หน้า
40	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างๆ..... 59
41	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง Pss ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรผสม IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างๆ..... 60
42	เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A200..... 60
43	เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A200..... 61
44	เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PSS ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A300..... 62
45	เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A200..... 62
46	เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ผสม IL ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A200 63
47	เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลีกโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ผสม IL ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A200..... 64
48	คุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เหลวกับเจลที่เตรียมจากปริมาณพุ่มซิลิกาต่าง ๆ ก) วางแนวตั้ง ข) วางแนวนอน..... 65
49	ค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นที่อัตราเร็วในการคายประจุ 10 และ 1 ชั่วโมงเปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะเหลวและเจลอิลีกโทรไลต์ที่ปริมาณพุ่มซิลิกาต่าง ๆ..... 66
50	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง..... 67
51	ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทา คริลิตต่างๆ โดยมีปริมาณพุ่มซิลิกา 5 %w/v..... 69

ภาพที่		หน้า
52	ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจล แบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอลิพีร์โรลต่างๆ โดยมีปริมาณฟุ้งซิลิกา 5 %w/v.....	70
53	ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจล แบตเตอรี่ ที่ปริมาณสารประกอบแอลกอฮอล์ต่างๆ โดยมีปริมาณฟุ้งซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคาย ประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง).....	71
54	ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจล แบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณสวานิลลินต่างๆ โดยมีปริมาณฟุ้งซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง).....	73
55	แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจล แบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เมื่อเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 0.005 %w/v โดยมีปริมาณฟุ้งซิลิกา 4 %w/v.....	74
56	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่เมื่อเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลกอฮอล์ 0.005 %w/v ปริมาณฟุ้งซิลิกา 4 %w/v กับเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 5% w/vแสดงค่าความ จุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) การทดสอบที่อัตรา การคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) การทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)...	75
57	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่บรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้น 0.01%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ฟุ้งซิลิกาคอนเซนตรชันต่างกัน และฟุ้งซิลิกา ขนาดอนุภาคต่างกันระหว่าง 7 และ 12 นาโนเมตร ณ อุณหภูมิ 25±2 °C.....	77
58	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นฟุ้งซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของฟุ้งซิลิกขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และฟุ้งซิลิกขนาด อนุภาค 7 นาโนเมตร (A300).....	78
59	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ที่ความเข้มข้นฟุ้งซิลิการ้อย ละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของฟุ้งซิลิกขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และฟุ้งซิลิกา ขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300).....	79
60	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ฟุ้งซิลิกขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) ความเข้มข้นฟุ้ง ซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	80

ภาพที่		หน้า
61	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PEDOT:PSS ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300).....	81
62	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PEDOT:PSS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	82
63	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PSS ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300).....	83
64	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PSS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300) ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	84
65	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300).....	85
66	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300) ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	86
67	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300).....	87
68	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PPy ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมสารเดิมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005 และ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	88
69	แสดงการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วชนิดเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 43 โดยปริมาตร ความเข้มข้นสารเดิมแต่งชนิดต่างๆ ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เทียบกับรอบการใช้งาน 15 รอบ.....	89

ภาพที่		หน้า
70	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์ต่างกัน โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ทดสอบที่อัตราเร็วในการคายประจุ 0.1C ที่อุณหภูมิต่างๆ	91
71	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์ต่างกัน โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ทดสอบที่อัตราเร็วในการคายประจุ 1C ที่อุณหภูมิต่างๆ	92
72	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ และไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ ที่อัตราการคายประจุสูง (1 C).....	93
73	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Gel commercial) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ (Gel invent) เจลที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เจลที่เติมสารเติมแต่ง Pss และเจลที่เติมสารเติมแต่ง PPy+IL ที่อัตราการคายประจุสูง (1 C).....	94
74	เปรียบเทียบพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าด้านลบของ แบตเตอรี่ โดยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังการทดสอบอายุการใช้งาน 200 รอบ ที่อัตราการคายประจุสูง (1 C) ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้น ไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ ค) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติม สารเติมแต่งแอลดีไฮด์ เจล ง) แบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จ) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นเติมสารเติมแต่ง PPy ฉ) เจลแบตเตอรี่ ที่คิดค้นขึ้นเติมสารเติมแต่ง Pss ช) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นเติมสารเติมแต่ง PPy+IL.....	95
75	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ.....	97
76	ความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต และแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร.....	98
77	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองหลังจากเก็บแบตเตอรี่เป็นเวลา 3 เดือน ระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร ก) แสดงค่าความต่างศักย์และระยะเวลาในการคายประจुरอบแรก ข) แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และ ระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน.....	99
78	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณพุ่มซิลิกาต่าง ๆ.....	100

ภาพที่		หน้า
79	เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง (3 เดือน) ระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณฟุ้งชิลิกาต่าง ๆ.....	101
80	อุปกรณ์ไฟกระพริบระบบเซลล์สุริยะ ก) ภายในอุปกรณ์สำหรับติดตั้งแบตเตอรี่ ข) เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ไฟกระพริบ.....	101
81	ผลการทดสอบการใช้งานแบตเตอรี่กับอุปกรณ์ไฟกระพริบ ก) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา ข) แสดงค่าความต่างศักย์เทียบเวลา.....	102

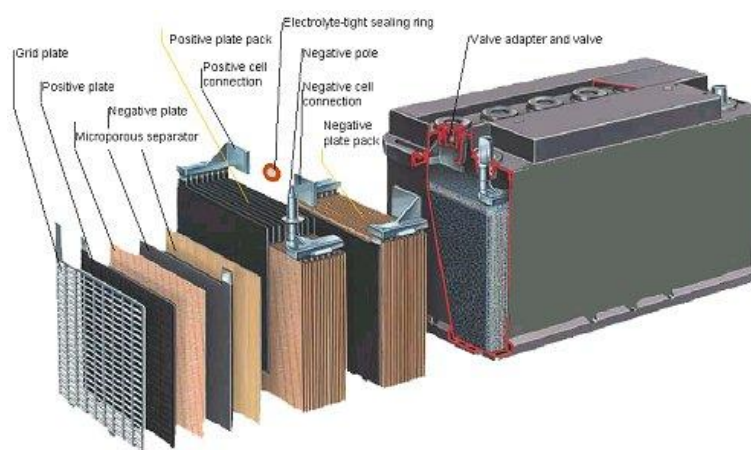
บทนำ

1. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery)

แบตเตอรี่ทุกชนิดมี แต่ละชนิดเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน และข้อจำกัดอื่นๆ เช่น ขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่ ตลอดจนรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละชนิดที่สอดคล้องกับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ แบตเตอรี่ทุกชนิดที่จัดได้ว่ามีอัตราการผลิต และความต้องการสูงสุด คือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้มีอัตราส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ได้ต่อมวล ของแบตเตอรี่ (energy per mass) ที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาถูกเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ จึงเป็นที่นิยมในการใช้งาน เมื่อขนาดของพื้นที่ในการติดตั้งแบตเตอรี่ไม่มีผลต่อการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ โดยการนำไปใช้งานหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ การนำไปสตาร์ท และ / หรือ ขับเคลื่อนรถยนต์ และจักรยานยนต์ หรือนอกจากนั้นยังนำไปใช้ในอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าสำรองซึ่งนับวันจะเพิ่มความสำคัญ มากยิ่งขึ้น โดยองค์ประกอบและหลักการทำงานโดยทั่วไปของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แสดงดังนี้

1.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

โดยทั่วไปแล้วแบตเตอรี่ตะกั่ว – กรด ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 1 คือ



รูปที่ 1 ส่วนประกอบต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด

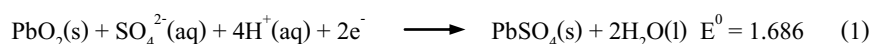
1. ตะแกรงขั้วบวก (Positive grid) สำหรับแบตเตอรี่ที่มีจำนวนรอบการใช้งานสูง จะทำจากอัลลอยด์ของตะกั่ว - พลวง (Pb-Sb) ในขณะที่แบตเตอรี่ที่มีจำนวนรอบการใช้งาน ต่ำ จะทำจากตะกั่วบริสุทธิ์ (Pb) หรือ ตะกั่ว-แคลเซียม (Pb-Ca) หรือ ตะกั่ว-แคลเซียม-ดีบุก (Pb-Ca-Sn) โครงสร้างนี้มีผลต่อการกัดกร่อนและความเครียดในแต่ละรอบการประจุไฟฟ้า

2. วัสดุขั้วบวก (Positive active-material, PAM) ทำจากตะกั่วออกไซด์ที่มีรูพรุนและพื้นผิวสูง
3. ตะแกรงขั้วลบ (Negative grid) ทำจากอัลลอยด์ของตะกั่ว-พลวง(Pb-Sb) หรือ ตะกั่ว-แคลเซียม (Pb-Ca) ปกติวัสดุพวกนี้ไม่มีผลต่อจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่
4. วัสดุขั้วลบ (Negative active-material, NAM) มีองค์ประกอบของตะกั่วและสารเติมแต่งที่มีรูพรุนและพื้นผิวสูง สารเติมแต่งมีส่วนช่วยในการรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แต่ได้นำไปใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส สารเติมแต่งก็จะถูกทำลาย ส่งผลให้เสียความจุของแบตเตอรี่
5. แพลทินัม (Separates) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิออนบวกและแพลทินัมลบปะทะกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น แพลทินัมนี้ทำจากไฟเบอร์กลาสหรือยางแข็ง เจาะรูพรุนเพื่อนำน้ำกรดสามารถไหลถ่ายเทไปมาได้ มีขนาดความกว้างยาวเท่ากับแผ่นขั้วบวกและแผ่นขั้วลบ
6. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในแบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในแบตเตอรี่รถยนต์จะใช้กรดซัลฟิวริก(H_2SO_4) ความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 - 1.34 อิเล็กโทรไลต์ยังเป็นแหล่งของซัลเฟตไอออนสำหรับการเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่
7. เซลล์ (Cell) คือช่องที่บรรจุแผ่นขั้วบวก แผ่นขั้วลบ ที่วางสลับกัน กันด้วยแพลทินัม แล้วจุ่มในน้ำกรด ในช่องหนึ่งจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2.1 โวลต์ โดยในแต่ละเซลล์จะมี ส่วนบนเป็นที่เติมน้ำกรดและมีฝาปิดป้องกันน้ำกรดกระเด็นออกมา และที่ฝาปิดก็จะมีรูระบายก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีให้ ระบายออกไปได้
8. ฝาปิดเซลล์ (Battery Cell Plug) หรือฝาปิดของเติมน้ำกรด ฝานี้จะมีรูระบายก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีภายในแบตเตอรี่ให้ สามารถระบายออกไปได้ ถ้าไม่มีฝาระบายนี้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี ก๊าซไฮโดรเจนจะไม่สามารถระบายออกไปได้ ทำให้เกิดแรงดันสูงจนแบตเตอรี่สามารถเกิดระเบิดขึ้นได้

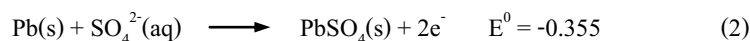
1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

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)

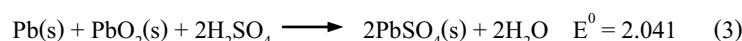
ระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้า ขั้วแคโทดหรือขั้วบวก อิเล็กโทรดที่อยู่ในรูป ตะกั่ว (IV) ออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน กับกรดซัลฟิวริก โดยมีตะกั่ว (II) ซัลเฟต และน้ำ เป็นผลผลิตดังสมการ



ส่วนที่ขั้วแอโนดหรือ ขั้วลบ อิเล็กโทรดจะอยู่ในรูปตะกั่ว ระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้าตะกั่วจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับซัลเฟตไอออน โดยมีตะกั่ว(II) ซัลเฟต เป็นผลผลิต ดังสมการ



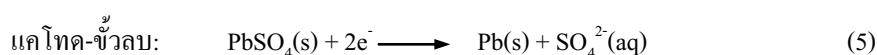
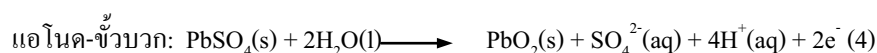
โดยปฏิกิริยารวม คือ



ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “the double sulfate reaction”

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

ปฏิกิริยาของเซลล์ข้างต้นเป็นแบบผันกลับได้ ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดการผันกลับจึงจำเป็นต้องมีการอัดไฟฟ้าใหม่ โดยการต่อขั้วบวกของเซลล์กับขั้วบวกของแบตเตอรี่และขั้วลบกับขั้วลบของแบตเตอรี่ เพื่อให้ปฏิกิริยาข้างบนเปลี่ยนทิศทางเป็นจากขวาไปซ้าย ในลักษณะนี้ตะกั่ว (II) ซัลเฟตที่ขั้วลบ ก็จะเปลี่ยน เป็นตะกั่ว ส่วนอีกขั้วหนึ่ง ตะกั่ว (II) ซัลเฟตจะเปลี่ยนเป็นตะกั่ว (IV) ออกไซด์ ดังสมการ



จากปฏิกิริยาในขณะที่มีการจ่ายไฟฟ้า ความเข้มข้นของกรดจะลดลงเรื่อย ๆ จากเดิมที่มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 ถึง 1.34 ขึ้นกับความเข้มข้นกรดที่ใช้และอุณหภูมิในขณะนั้น ๆ ถ้าหากเมื่อใดมีความถ่วงจำเพาะลดลงจนต่ำกว่า 1.20 ที่อุณหภูมิห้องก็ควรจะมีการประจุไฟฟ้าใหม่

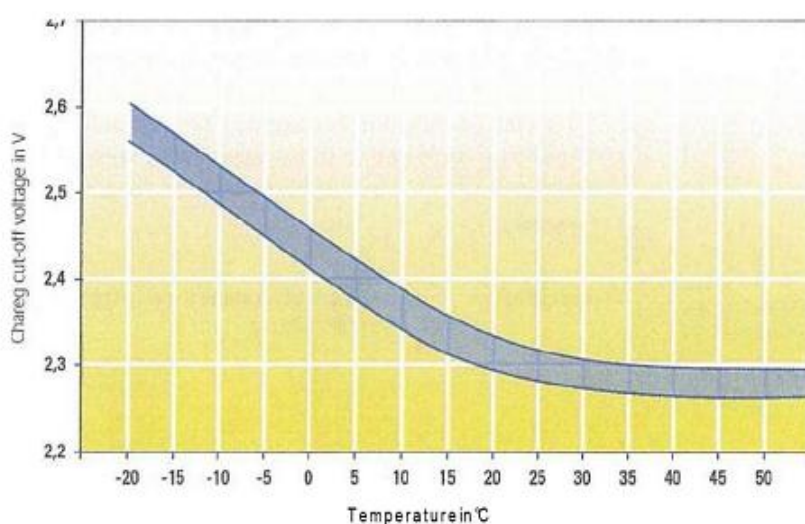
ดังนั้นระหว่างขบวนการจ่ายและการประจุไฟฟ้าจะมีกลไกการละลาย และการพอกพูนของธาตุตะกั่วและตะกั่วออกไซด์ในรูปตลอดเวลา และจากปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะเห็นได้ว่า กรดซัลฟิวริกมีความจำเป็นเนื่องจากเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี นอกจาก นั้นกรดซัลฟิวริกยังทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ระหว่างกระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2

นอกจากปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ที่เกิดจากกระบวนการอัดและคายประจุแล้ว หากแบตเตอรี่เกิดการอัดประจุเกินขนาด (overcharge) หลังจากการประจุไฟฟ้าสมบูรณ์แล้ว ประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงดังที่ได้กล่าว ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน ออกจากแบตเตอรี่ระหว่างขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และทำให้ปริมาณน้ำในแบตเตอรี่ลดลง ส่งผลให้การดัดแปลงฟิสิกส์มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลเสียต่อสมรรถภาพการทำงานของแบตเตอรี่ อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง ตลอดจนความสามารถในการเก็บประจุต่ำลง

1.2.1 การอัดและการคายประจุ (Charging and discharging)

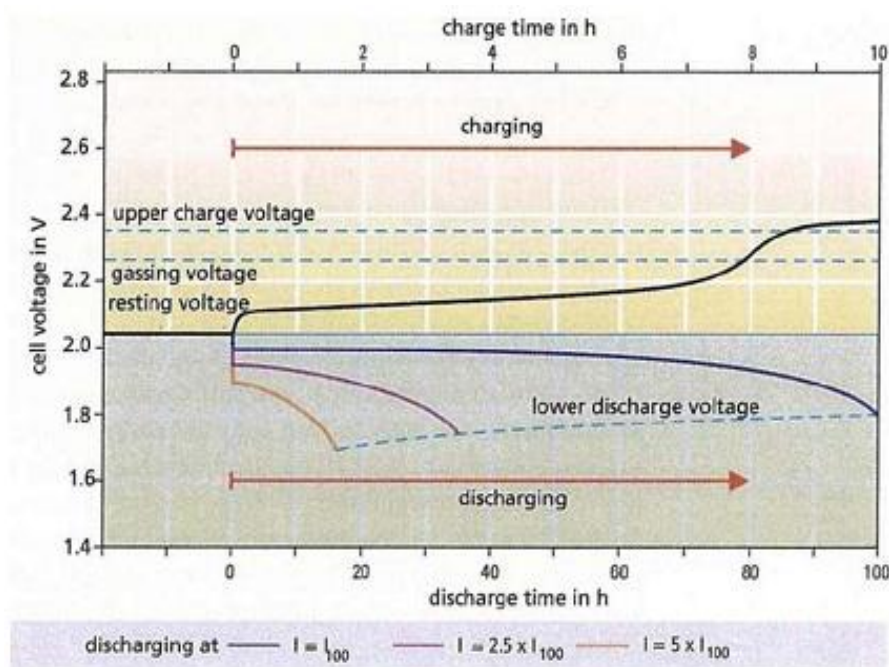
ระหว่างกระบวนการอัดประจุ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว - กรดนั้นหากปล่อยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที น้ำจะถูกแยกตัวออกเป็นออกซิเจนและไฮโดรเจน เรียก oxy-hydrogen gas ซึ่งสามารถจุดติดไฟและระเบิดได้ง่าย ดังนั้นจึงควรจำกัดความต่างศักย์ไฟฟ้าตอนอัดประจุไม่ให้เกิน ค่าความต่างศักย์ปลดออก (charge cut-off voltage) เมื่ออัดประจุ ค่าความต่างศักย์ปลดออกของแบตเตอรี่ตะกั่ว - กรดแสดงดังรูปที่ 2

ระหว่างกระบวนการคายประจุ เมื่อเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างทันทีเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้า ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร จากนั้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้สิ้นสุดกระบวนการ หรือจนถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าปลดออกเมื่อคายประจุ (discharge cut-out voltage) หากปล่อยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงต่อไป นกระทั้งต่ำกว่าค่านี้ จะทำให้ความเข้มข้นของกรดจะมีค่าสูงมาก ส่งผลทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์เพนบนขั้วไฟฟ้า และเกิดการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าขึ้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ในรูปที่ 3 แสดงลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดในช่วงกระบวนการอัดและการคายประจุ charge cut-off voltage (หรือ upper charge voltage), discharge cut-out voltage (หรือ lower discharge voltage) และ gassing voltage



รูปที่ 3 ลักษณะความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 100 แอมป์แอมป์-ชั่วโมง ในช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ

1.2.2 ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Capacity of battery)

ความจุของแบตเตอรี่คือ ประจุไฟฟ้าที่คาดว่าจะได้รับจากแบตเตอรี่ โดยทั่วไปอยู่ในหน่วยของแอมป์-ชั่วโมง ค่าความจุของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่ การคำนวณความน่าจะเป็นของค่าความจุของชั่วโมงไฟฟ้านั้น (Nominal Capacity, C) สามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) แสดงดังสมการที่ 6

$$C = WnF/M \quad (6)$$

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

นอกจากนี้การหาค่าความจุของแบตเตอรี่ที่ได้จริงนั้นสามารถหาได้จากการทดสอบ โดยกำหนดค่ากระแสที่ง่ายหรือดีจ่อระหว่างการคายประจุ หาระยะเวลาที่ทำให้ค่าความต่างศักย์ลดลงจนถึงค่าที่กำหนดหรือจุดตัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (charge cut-off voltage) โดยค่าความจุของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากสมการ 7 และ 8

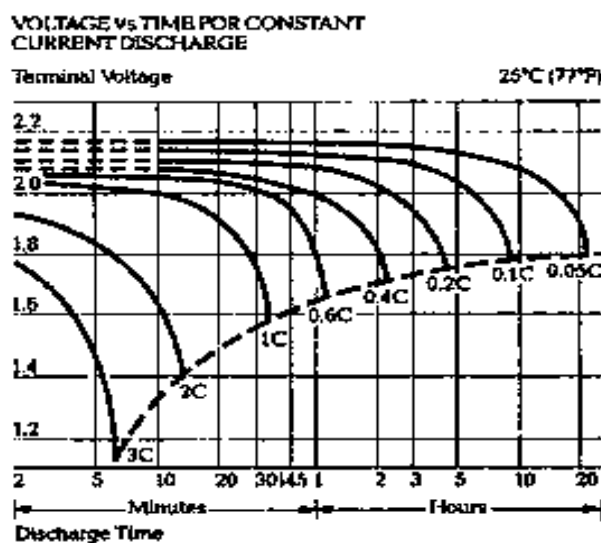
$$C = \int_0^t I(t) dt \quad (7)$$

$$C = I \Delta t \quad (8)$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

Δt = ระยะเวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)

สำหรับการหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่นั้น ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการกำหนดจุดตัดมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการคายประจุ ที่ใช้ทดสอบแบตเตอรี่ ตัวอย่างจุดตัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อัตราเร็วในการคายประจุต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการคายประจุ จุดสิ้นสุดของค่าความต่างศักย์ที่อัตราเร็วในการคายประจุต่าง ๆ สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดไม่ต้องการการบำรุงรักษา

1.2.3 อัตราการคายประจุ และอัตราการอัดประจุ

อัตราการคายประจุและการอัดประจุจะใช้การเปรียบเทียบค่ากระแสที่ถูกใช้ในการประจุแบตเตอรี่และขึ้นกับค่าความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะแสดงเป็นจำนวนชั่วโมง เช่น อัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) และอัตรา 240 ชั่วโมง (240 hour

rate) เป็นต้น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบที่อัตราการคายและอัตราการอัดประจุต่างๆสามารถคำนวณจากค่าความจุที่แบตเตอรี่สามารถคายประจุได้ หาคด้วยจำนวนชั่วโมงดังแสดงในสมการที่ 9

$$\text{Rate (charge/discharge)} = \frac{C}{t} \quad (9)$$

เมื่อ $\text{Rate (charge/discharge)} = \text{กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดหรือคาย}$

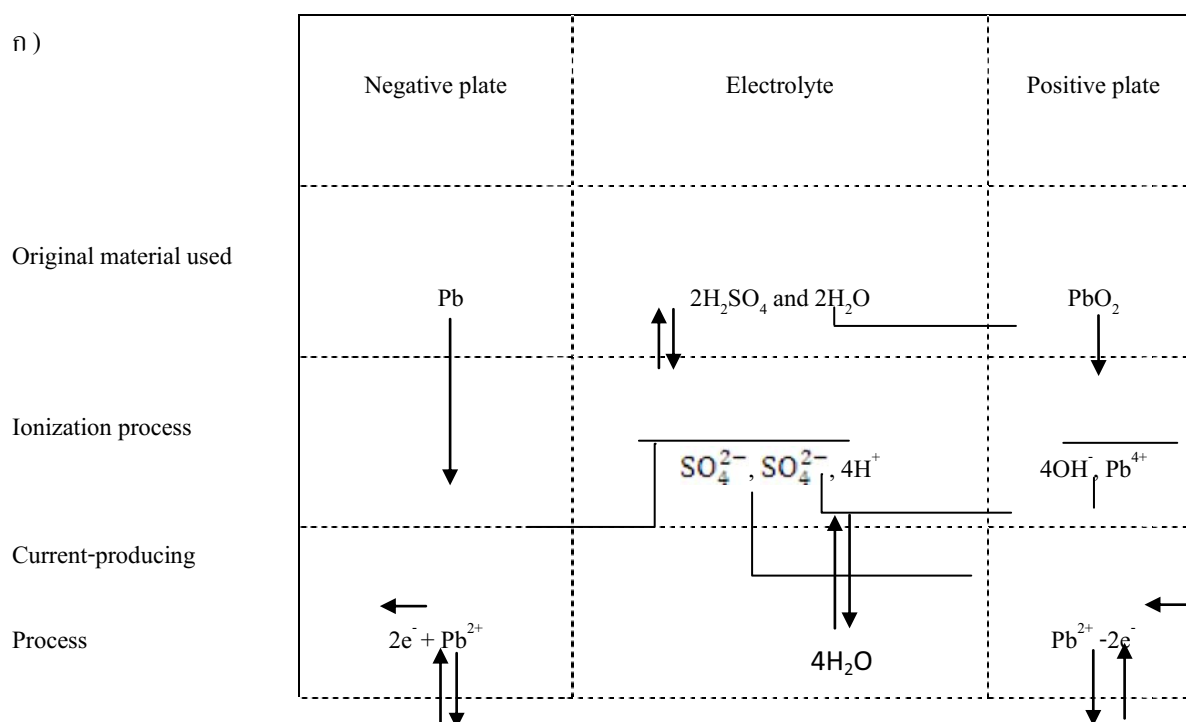
ประจุแบตเตอรี่ (แอมแปร์)

$C = \text{ค่าความจุของแบตเตอรี่ (แอมแปร์-ชั่วโมง)}$

$t = \text{อัตราการคายหรือการอัดประจุที่ใช้ (ชั่วโมง)}$

ตัวอย่างเช่น $C/10$ (0.1C) หรืออัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) หมายถึง ค่ากระแสเทียบเท่า Rated Capacity ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง หาคด้วย 10

ก)



Final products of discharge	PbSO_4	(Less amt used) $2\text{H}_2\text{O}$ --- $2\text{H}_2\text{O}$	PbSO_4
ข)	Negative plate	Electrolyte	Positive plate
Final products of discharge	PbSO_4	$4\text{H}_2\text{O}$	PbSO_4
Ionization process	$\text{Pb}^{2+}, \text{SO}_4^{2-}$	$2\text{H}^+, 4\text{OH}^-, 2\text{H}^+$	$\text{SO}_4^{2-}, \text{Pb}^{2+}$
Process produced by current	$2e^-$		$-2e^-$
Original materials restored	Pb	$2\text{H}_2\text{O}$ $\text{H}_2\text{SO}_4 \quad \text{H}_2\text{SO}_4$	PbO_2

รูปที่ 5 ปฏิบัติการคายและการอัดประจุภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ก) ปฏิบัติการคายประจุไฟฟ้า ข) ปฏิบัติการอัดประจุไฟฟ้า

2. ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด

โดยทั่วไปสามารถแบ่งแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรดออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบอิเล็กโทรไลต์เหลวหรือแบตเตอรี่แบบเปียก

(Flooded battery or Wet cell battery)

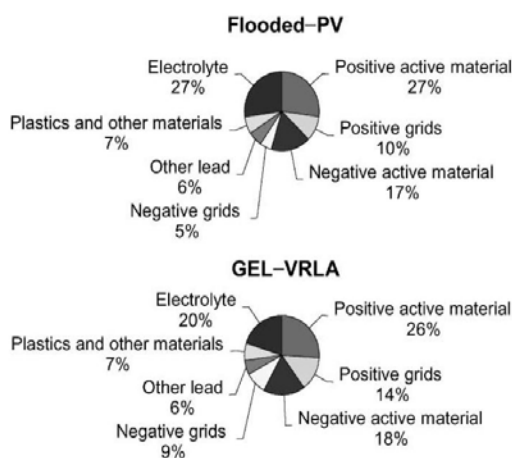
โดยปกติแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ได้ถูกออกแบบในลักษณะที่มีกรดซัลฟิวริกอยู่ในสถานะของเหลว ซึ่งเรียกว่า “flood-electrolyte lead acid battery” แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิดนี้จะมีการสูญเสียน้ำระหว่างกระบวนการประจุไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้มาสู่ระยะหนึ่ง จะมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาประจุไฟฟ้า (recharge reaction) ลดลง (เริ่มจากประสิทธิภาพน้อยกว่าประมาณ 85%) และเนื่องจากการประจุไฟฟ้าเกิน (overcharge) หลังจากประจุไฟฟ้าสมบูรณ์แล้ว ประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดประเภทนี้ต้องการกรดซัลฟิวริกในปริมาณที่มากและจะต้อง มีช่องสำหรับเติมน้ำกลั่น เพื่อรักษาระดับของสารละลาย ความเข้มข้นของกรดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม อิเล็กโทรไลต์เหลวให้อยู่เหนือขั้วอิเล็กโทรดตลอดเวลา และต้องมีการประจุไฟฟ้าคืนให้แบตเตอรี่ภายในเวลาอันรวดเร็ว เพื่อป้องกันการเสื่อมสมรรถภาพของแบตเตอรี่ จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องการการบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งาน

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

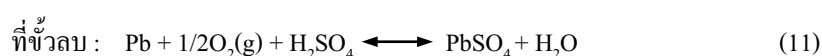
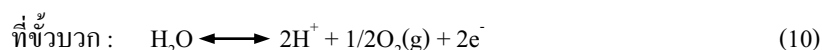
จากปัญหาที่การสูญเสียน้ำในแบตเตอรี่ในระหว่างการใช้งาน รวมทั้งการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์ที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดรูปแบบใหม่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสภาพยากต่อการเคลื่อนไหว (immobilized electrolyte) ซึ่งเรียกว่า แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม (valve-regulated lead-acid battery,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

ผลการวิเคราะห์มวลองค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดเจลขนาด 12 โวลต์ 84 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่ใช้งานสำหรับเซลล์สุริยะ เทียบกับแบตเตอรี่แบบเปียกขนาด 12 โวลต์ 84 แอมแปร์-ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์มวลองค์ประกอบเจลแบตเตอรี่เทียบกับแบตเตอรี่แบบเปียก

เนื่องจากการออกแบบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม นั้น ไม่สามารถเปิดออกเพื่อเติมน้ำได้ และมีความต้องการอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่น้อยกว่าแบบเดิมมาก ส่งผลให้มีการกัดกร่อนของอิเล็กโทรดที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างการประจุแบตเตอรี่ที่ขั้วบวกสามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่สภาพเจลไปยังขั้วลบที่เกิดขึ้นได้ดีเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสถานะของเหลว และออกซิเจนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีผลิตภัณฑ์เป็นน้ำผ่านขบวนการ oxygen-recombination cycle ที่ขั้วลบแทนที่จะโดนปล่อยออกจากแบตเตอรี่ ทำให้การสูญเสียน้ำ (water loss) ในปริมาณที่น้อย สำหรับขบวนการ oxygen-recombination cycle ประกอบด้วยปฏิกิริยาดังสมการ



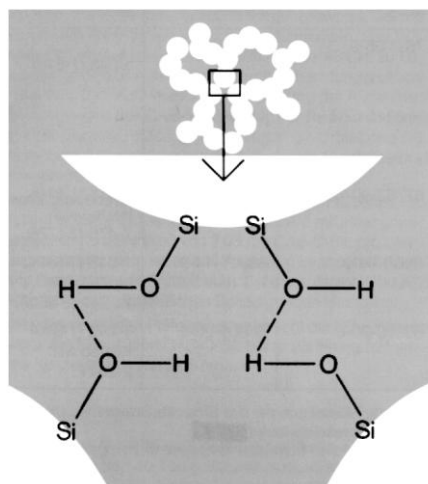
โดยที่ขบวนการนี้ก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ขั้วบวกจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วลบและเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วลบ(ปฏิกิริยาตามสมการ (11)) และป้องกันการไม่ให้อิเล็กโทรดมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงจนทำให้เกิดปฏิกิริยาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน แต่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาตามสมการ (12) เกิดขึ้นแทน ซึ่งเป็นผลดีโดยไม่ต้องเติมน้ำให้กับแบตเตอรี่เป็นประจำ จึงจัดเป็นแบตเตอรี่ที่ต้องการการบำรุงรักษาค่า (maintenance-free) ด้วยเหตุผลดังกล่าวแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาให้มีสมรรถภาพดีขึ้น รวมทั้งสามารถใช้แทนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบดั้งเดิมที่มีอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสภาพของเหลวได้

ความร้อนที่เกิดขึ้น ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมส่งผลกระทบต่อ ขบวนการ oxygen-recombination cycle และโพลาไรเซชัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมและป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป สำหรับข้อดีของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดนี้คือ จำนวนรอบการใช้งานที่ยาวนานกว่า ต้องการการบำรุงรักษาค่า และสามารถนำไปใช้งานอุปกรณ์หลากหลาย เช่น เซลล์สุริยะ ยานยนต์ต่างๆ เป็นต้น

3. เคมีของเจล (Gel chemistry)

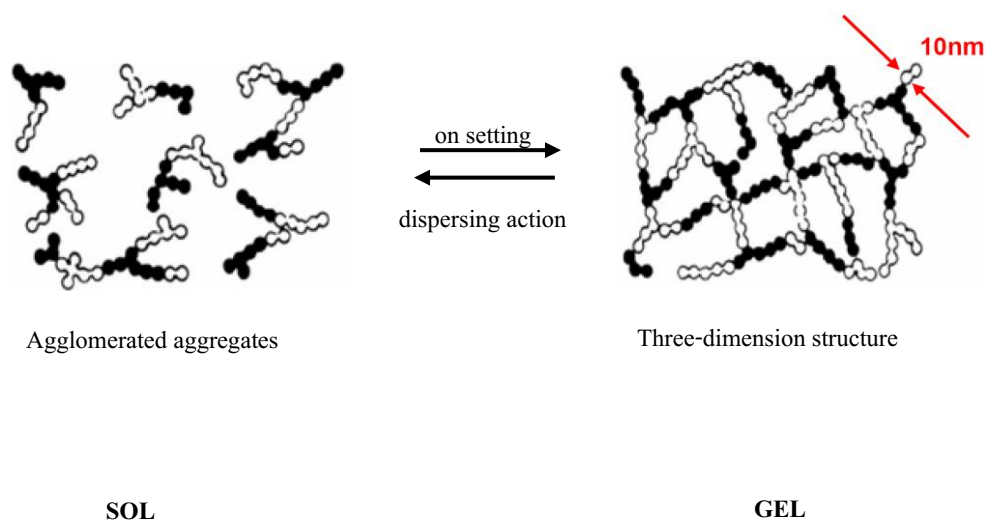
เจล (gel) คือ โครงสร้าง สามมิติที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน การสร้างโครงสร้างเจลประกอบด้วยสองขั้นตอนสำคัญ ดังนี้ [20,21]

1. ขั้นตอนการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างอ่อนๆ เป็นขั้นตอนที่ผันกลับได้ โดยซัลเฟตไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคประจุบวกบนผิวซิลิกา (SiO_2) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ขั้นตอนการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาค .

2. ขั้นตอนการสร้างพันธะซิลิเซน (Si-O-Si) ที่มีความแข็งแรงระหว่างอนุภาคซิลิกา เป็นขั้นตอนการสร้างโครงสร้างของเจลซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถเกิดการผันกลับได้เมื่อมีแรงมากระทำกับเจล ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างของเจลและการผันกลับของโครงสร้างเจลด้วยพันธะซิลิเซน

โดยขั้นตอนที่สองจะมีความสำคัญมากต่อการเกิดเจล ซึ่งพบว่าอุณหภูมิมีผลอย่างมากตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส เช่น อัตราการเกิดเจลจะมากขึ้นเป็นสองเท่า ทุก ๆ การเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10 องศาเซลเซียส และปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของเจล ได้แก่ ค่า pH ชนิดและความเข้มข้นของเกลือ รวมทั้งปริมาณและขนาดอนุภาคซิลิกา

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและการก่อตัวเป็นเจลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว และเหมาะสมต่อกลุ่มประเทศที่มีลักษณะอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วย
2. ศึกษาการเตรียมอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์สำหรับใช้งานในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม
3. ศึกษาผลของสารเติมแต่งในเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์สำหรับใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม
4. ทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุม โดยใช้เจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่เตรียมขึ้น และหาสูตรเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่ดีที่สุดเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการผลิตจริง

การทดลอง

เนื่องจากโครงการนี้มุ่งเน้นความสำคัญใน การหาองค์ความรู้ใหม่ควบคู่กับการนำองค์ความรู้นี้ไป ใช้งานได้จริง โดยมีเป้าหมายสำคัญ คือ การคิดค้นแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมชนิดเจล (เจลแบตเตอรี่) เพื่อเป็นต้นแบบในการผลิตสำหรับการนำไปใช้งานได้จริงและสามารถจำหน่ายออกสู่ตลาดได้ต่อไป ดังนั้นในส่วนของการทดลองจึงแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1. การทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ 2. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ และในหัวข้อสุดท้าย 3. การนำสูตรเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่ได้มาผลิตเป็นเจลแบตเตอรี่และนำผลิตภัณฑ์เจลแบตเตอรี่ที่ได้มานี้มาทดสอบการใช้งานจริง ด้วยการติดตั้งในอุปกรณ์ไฟกะพริบระบบเซลล์สุริยะ (โซลาร์เซลล์) เปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วควบคุมชนิด AGM ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

1. การทดสอบคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์

การทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเกิดเจลและความแข็งแรงของเจล ส่วนที่สองเป็นการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ ส่วนสุดท้าย คือ การทดสอบปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

1.1 การทดสอบระยะเวลาการเกิดเจล (Gelling time)

ศึกษาถึงลักษณะเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่เตรียมได้และเวลาการเกิดเจล โดยใช้ หย่อนลูกตะกั่วขนาด 3 มิลลิเมตร จนกระทั่งระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วในเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่ ระยะทางที่ไม่เปลี่ยนแปลง แสดงถึงระยะเวลาการเกิดเจล แต่หากระยะทางการเคลื่อนที่ในตอนเริ่มต้นคงที่ตลอดเวลา กล่าวได้ว่าเจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพเป็นเจลได้ภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับเวลาในการเกิดเจล เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต เจลอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่มีความหนืดต่ำ จะไหลได้ดี และใช้เวลาในการเกิดเจลมากกว่า 3 ชั่วโมง จะสามารถเติมลงแบตเตอรี่ได้ ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย

- ผลของปริมาณฟลูออรีน

นำฟลูออรีนปริมาณที่ต่างกันตั้งแต่ 3, 4, 5 และ 6 %w/v ผสมกับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.325 g/cm³ ด้วยอัตราเร็ว 2000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

- ศึกษาผลของความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก

กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น ที่ 40,50,60,65 และ 70 %w/v ผสมกับฟลูออรีนความเข้มข้น 6 %w/v ด้วยอัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

- ศึกษาผลของปริมาณโซเดียมซัลเฟต

ใช้ความเข้มข้นโซเดียมซัลเฟตที่ 1.5, 7.5 และ 15 %w/v ผสมกับฟลูออรีนความเข้มข้น 5% w/v ด้วยอัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

- ศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวน

ใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ 1500, 2000, 3000 และ 4000 รอบต่อนาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 65 %w/v กับฟลูออรีนความเข้มข้น 5 %w/v ใช้เวลาในการกวน 10 นาที

- ศึกษาผลของเวลาในการกวน

ผสมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 65 %w/v กับฟลูออรีนความเข้มข้น 5 %w/v ด้วยความเร็ว 1500 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการกวน 10, 15, 20 และ 25 นาที

- การศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์

สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ วานิลลิน (Va) สารประกอบแอลดีไฮด์ (AL) พอลิเอครีลาไมด์ (PAM) พอลิไพร์โรล (PPY) พอลิเมทิลเมทาครีเลต (PMMA) ในการทดลองใช้สารเติมแต่งที่ความเข้มข้น 0.005 – 0.5 กรัม และปริมาณฟลูออรีน 3, 4 และ 5 %w/v ผสมกับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.325 g/cm³ ด้วยอัตราเร็ว 2000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจล

1.2 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้า

การทดสอบค่าการนำไฟฟ้าจะทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ เพื่อศึกษา วิธีการเบื้องต้นในการเลือกเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุม เนื่องจากการวัดค่าการนำไฟฟ้าอาจมีความสัมพันธ์ที่แปรผันตรงต่อค่าความจุไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้ ทำการ วัดค่าการนำไฟฟ้า ด้วยเครื่อง Multi pH-Conductivity Meter จากบริษัท Mettler-Toledo รุ่น S47 และจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ด้วยอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะแบตเตอรี่ ดังจะกล่าวต่อไป เพื่อยืนยันและ ตรวจสอบ ความแม่นยำของวิธีการการวัดค่าการนำไฟฟ้า ของเจลอิเล็กโทรไลต์

- ขั้นตอนในการวัดค่าการนำไฟฟ้า

1. ทำการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยองค์ประกอบของ เจลอิเล็กโทรไลต์ ที่ใช้ในการทดสอบเตรียมได้ดังตารางที่ 1 โดยเจลที่เตรียมได้จะถูกบรรจุลงในภาชนะที่เตรียมไว้ จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ให้เจลอยู่ตัวและมีความเสถียร จึงนำมาวัดค่าการนำไฟฟ้าและบันทึกผล
2. ทำการสอบเทียบเครื่อง Multi pH-Conductivity Meter ก่อนใช้งาน โดยนำอิเล็กโทรด จุ่มในสารละลายมาตรฐาน 100000 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร จากนั้นกดปุ่ม cal และบันทึก
3. ล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และบันทึกผล โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 1 อิเล็กโทรไลต์เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ ที่อัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที

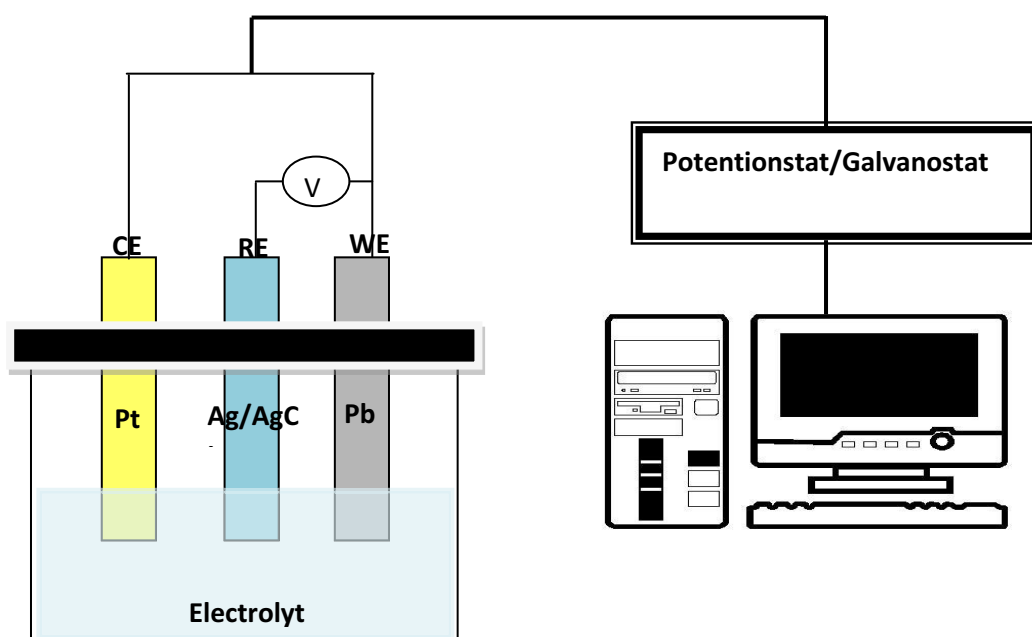
สถานะ	สารเติมแต่ง	องค์ประกอบ
เจล	➤ ไม่มีสารเติมแต่ง (No additive)	1.280 and 1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ ➤ 2 %w/v of fumed silica particle size 7 and 12 nm ➤ 3 %w/v of fumed silica particle size 7 and 12 nm ➤ 4 %w/v of fumed silica particle size 7 and 12 nm ➤ 5 %w/v of fumed silica particle size 12 nm
	➤ Polypyrrole, doped composite with carbon black (PPy) ➤ Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene) /poly(stylenesulfonate) (PEDOT:PSS) ➤ Ponceau SS (Pss) ➤ Ionic liquid (IL) ➤ PPy+IL ➤ Pss+IL	1.280 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ ➤ 2-5 %(w/v) of fumed silica particle size 7 and 12 nm ➤ Additive - 0.005 % w/v - 0.01 % w/v - 0.02 % w/v

1.3 การวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนภายในแบตเตอรี่นั้น หมายถึง ปฏิกิริยาการสูญเสียประจุระหว่างการอัดประจุเกินขนาดให้กับแบตเตอรี่ หากปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ง่ายและเร็วจะส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง ในการทดลองนี้ใช้เครื่อง Potentionstat/Galvanostat โปรแกรม Electrochemical Spectroscopy (GPES) ในการวิเคราะห์ใช้

เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 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 10

สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาวิเคราะห์ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 10 แผนภาพการทดสอบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

- ขั้นตอนการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์

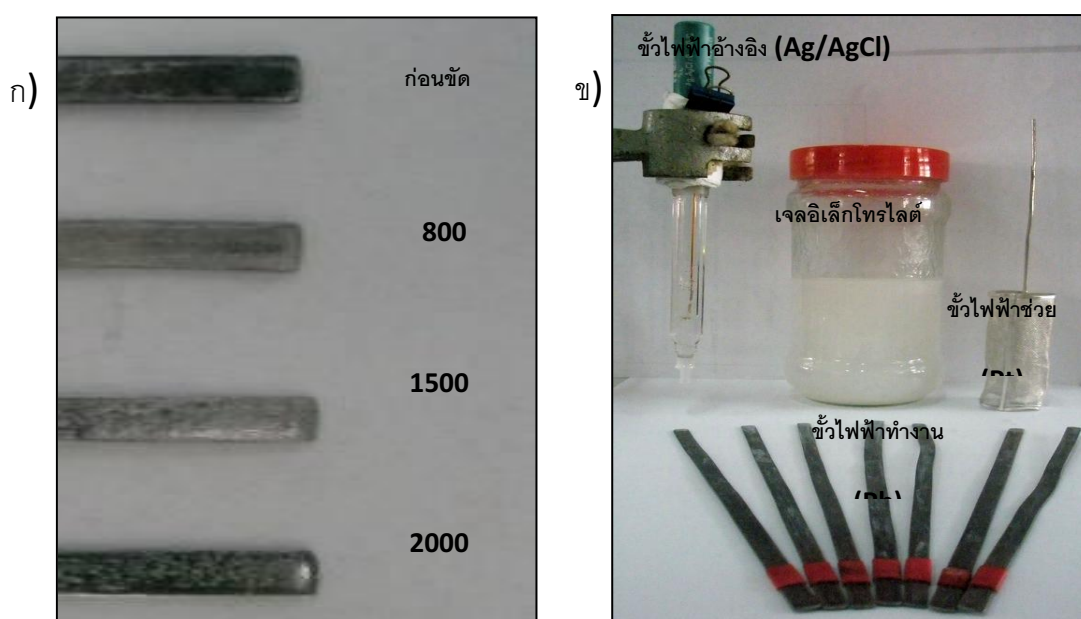
เตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ตามองค์ประกอบเช่นเดียวกับดังตารางที่ 1 ด้วยอัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที และตามตารางที่ 2 ด้วยอัตราเร็ว 2000 รอบต่อนาที จากนั้นทิ้งเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในให้อยู่นิ่งเป็นระยะเวลา 5 วัน นำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ ทำการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 2 อิเล็กโทรไลต์เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ ที่อัตราเร็ว 2000 รอบต่อนาที สำหรับนำมาทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

สถานะ	อิเล็กโทรไลต์	องค์ประกอบ
เหลว	➤ สารละลายกรดซัลฟิวริก	1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄
	➤ สารละลายกรดซัลฟิวริกเดิม โซเดียมซัลเฟต	1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ and 13.25 g/L of Na ₂ SO ₄
เจล	➤ ไม่มีสารเติมแต่ง	1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ and 13.25 g/L of Na ₂ SO ₄ ➤ 3 %w/v of fumed silica ➤ 4 %w/v of fumed silica ➤ 5 %w/v of fumed silica
	➤ พอลิแอคริลาไม	1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ and 13.25 g/L of Na ₂ SO ₄ ➤ 5 %(w/v) of fumed silica - 0.005 % w/v - 0.01 % w/v - 0.05 % w/v
	➤ พอลิพีร์โรล	1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ and 13.25 g/L of Na ₂ SO ₄ ➤ 5 %(w/v) of fumed silica - 0.005 % w/v - 0.01 % w/v - 0.05 % w/v
	➤ สารประกอบแอลดีไฮด์	1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ and 13.25 g/L of Na ₂ SO ₄ ➤ 4 %(w/v) of fumed silica - 0.005 %w/v - 0.01 %w/v
	➤ เวนนิลิน	1.325 g/cm ³ of H ₂ SO ₄ and 13.25 g/L of Na ₂ SO ₄ ➤ 4 %(w/v) of fumed silica - 0.005 %w/v - 0.01 %w/v - 0.03 %w/v

- ขั้นตอนการเตรียมขั้วทำงาน

1. ขั้วทำงานเตรียมจากแผ่นตะกั่วบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ตัดให้มีขนาด 0.5 x 15 เซนติเมตร
2. เตรียมพื้นผิวขั้วทำงานโดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800, 1500 และ 2000 ตามลำดับ
3. ตัดต่อหลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร ให้ยาว 1 เซนติเมตร สำหรับ กำหนดพื้นที่ขั้วทำงานให้มีขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตร (0.5 x 1.0 เซนติเมตร)
4. เช็ดให้สะอาดและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
5. นำขั้วที่สะอาดมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 30 นาที
สำหรับขั้วทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (ก) พื้นผิวขั้วไฟฟ้าทำงานเมื่อขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ (ข) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์

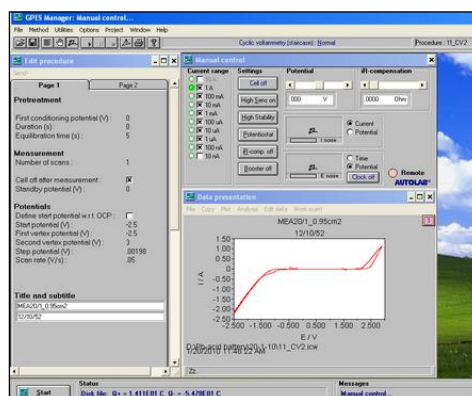
- ขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี คือ เครื่อง Potentionstat/Galvanostat โดยเลือกโปรแกรม GPES ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง -2.5 ถึง 3.0 โวลต์ และค่า Scan rate ที่ 50 mV/sec ดังแสดงในรูปที่ 12 (ก) และ (ข)

ก)



ข)



รูปที่ 12 แสดง ก) เครื่อง Potentio stat/Galvan stat รุ่น PGSTA30 ของบริษัท AUTOLAB ข) หน้าต่างโปรแกรม GPES ของเครื่อง Potentiostat/Galvan stat

2. การทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

ในงานวิจัยนี้ใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดความจุสูง ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดการใช้งานแบบอยู่กับที่ ขนาด 4 และ 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ (ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่) โดยทั่วไปแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและหลายรูปแบบ อาทิ ใช้ในเครื่องสำรองไฟ (UPS) ไฟสำรองฉุกเฉิน (Emergency light) ไฟต่างๆ ที่ใช้ในท้องถนน (Solar street light) ซึ่งสามารถอัดประจุ (Charge) โดยพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น จากสถานะการใช้งานดังกล่าว จึงแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน คือ 1. การหาค่าความจุในการคายประจุทั้งหมด (100% DOD) ทดสอบโดยใช้ 2 อัตราเร็ว คือ การใช้งานแบบการคายประจุที่อัตราเร็วต่ำ (Low-rate discharge, 10 hr) และการใช้งานแบบการคายประจุที่อัตราเร็วสูง (High-rate discharge, 1 hr) 2. การใช้งานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ 3. การหาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยนำสูตรเจลลี่เล็กโทรไลต์ที่ให้สมรรถนะดีที่สุด มาเปรียบเทียบกับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปทางการค้าโดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ (ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.วี.แบตเตอรี่) ทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง และในส่วนสุดท้ายให้ความสำคัญ ของความสามารถในการเก็บก่อนการใช้งานของแบตเตอรี่หรือการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ (Self discharge) และสมรรถนะของแบตเตอรี่หลังการเก็บ (Shelf storage)

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

สำหรับเครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ คือ เครื่อง Universal battery analyzer 4 (UBA 4) ดังแสดงในรูปที่ 13 และขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 13 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ UBA 4 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุต่ำ (อัตราการคายประจุ 10 ชั่วโมง)

ตารางที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (0.8 A/14.1 V/7 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (0.4 A/10.5 V)
4	อัดประจุ (0.8 A/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

- หมายเหตุ**
- การอัดประจุลงในแบตเตอรี่และคายประจุออกทั้งหมด เรียกว่า การทดสอบ 1 รอบ
 - การอัดประจุ (0.8 A/14.1 V/7 hr) หมายถึง ใช้กระแสไฟฟ้าในการอัดประจุที่ 0.8 แอมป์แปร์ กำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าถึง 14.1 โวลต์ ใช้ระยะเวลาในการอัดประจุทั้งหมด 7 ชั่วโมง
 - การคายประจุ (0.4 A/10.5 V) หมายถึง ดึงกระแสไฟฟ้าในการคายประจุที่ 0.4 แอมป์แปร์ จนกระทั่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงถึง 10.5 โวลต์

2.2 การทดสอบอัตราการคายประจุสูง (High-rate discharge, 1 hr rate)

สำหรับเครื่องทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุสูง คือ เครื่อง Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 ดังแสดงในรูปที่ 14 และขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 14 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการคายประจุสูง (อัตราการคายประจุ 1 ชั่วโมง)

ตารางที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดของเหลวและเจล (12 V/4Ah) แบบการคายประจุทั้งหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง

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

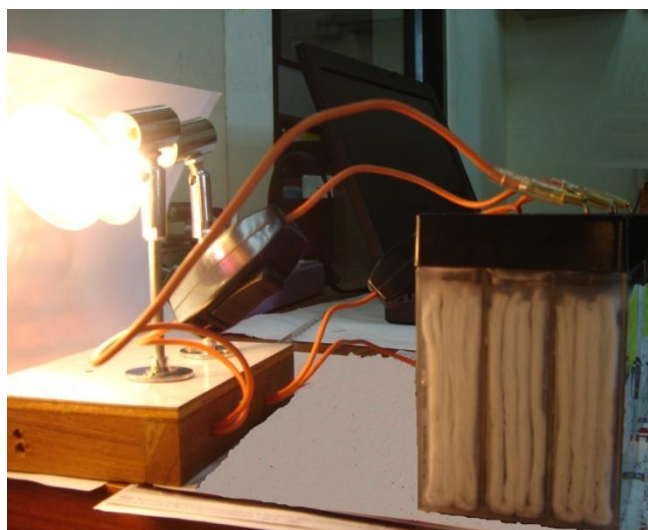
2.3 การทดสอบอัตราการคายประจุสูง (High-rate discharge, 1 hr rate) แบบ manual

2.3.1 ขั้นตอนในการทดสอบแบตเตอรี่อัตราการคายประจุสูงแบบ manual

เจลลี่เล็กโพลีโกล์ที่เตรียมได้ดังตารางที่ 2 จะถูกบรรจุลงในแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง (12 V/4Ah) ด้วยเครื่องเติมระบบสุญญากาศ เจลแบตเตอรี่ที่ได้จะนำมาทำการอัดประจุ (Charge) และคายประจุ (discharge) โดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ด้วยแคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter) และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยมัลติมิเตอร์ (multimeter) แบบ manual ดังรูปที่ 15 ซึ่งการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการอัดประจุจะทำการวัดทุก 15 นาที ขณะที่การวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการคายประจุจะทำการวัดทุก 5 นาที จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณค่าความจุไฟฟ้าในการอัดประจุ (charge capacity) และค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุ (discharge capacity) ของแบตเตอรี่ ค่าความจุไฟฟ้า (C_p) สามารถคำนวณได้จากการ นำค่ากระแสไฟฟ้า (I) คูณกับจำนวนเวลาที่ได้ใช้ไป (t) ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 5



การอัดประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ (Charge)



การคายประจุไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (Discharge)

รูปที่ 15 แสดงการอัดประจุ (charge) และการคายประจุ (discharge) แบบ manual

ตารางที่ 5 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดเจล (12 V/4Ah) ด้วยการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (1 A/5 hr)
2	พัก (20 hr)
3	คายประจุ (3 A/9.6 V)
4	อัดประจุ (1 A/5 hr)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 เป็นจำนวน 5-15 ครั้ง

2.4 การใช้งานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ

ในการทดสอบแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ จะใช้วิธีในการทดสอบ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะทดสอบสมรรถนะแบตเตอรี่ด้วยเครื่อง Universal battery analyzer 4 (UBA 4) ดังแสดงในรูปที่ 5 ทดสอบที่ที่อัตราการคายประจุต่ำในช่วงอุณหภูมิ 0 – 60 องศาเซลเซียส จำนวน 4 รอบ (การทดสอบนี้ทำการอัดประจุที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิรุ่น WNE 7 บริษัท memmert ขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดของเหลวและเจล (12 V/4Ah) ด้วยการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (0.8A/14.1 V/7 hr)
2	พัก (5 hr)
3	คายประจุ (0.4 A/10.5 V/30 °C)
4	อัดประจุ (0.8A/14.1 V/11 hr/ 0 °C)
5	ทำซ้ำลำดับที่ 3 ถึง 4 เป็นจำนวน 3 ครั้ง
6	ทำซ้ำลำดับที่ 1 ถึง 5 เปลี่ยนอุณหภูมิลำดับที่ 4 เป็น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

ขณะที่ส่วนที่ 2 จะทำการทดสอบสมรรถนะแบตเตอรี่ ด้วยวิธีแบบ manual โดยจะทำการอัดประจุและคายประจุที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 55 องศาเซลเซียส โดยการควบคุมอุณหภูมิจะใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WNE 7 บริษัท memmert เช่นเดียวกับการทดสอบสมรรถนะด้วยเครื่อง UBA 4 โดยในการทดสอบสมรรถนะนี้ทำการทดสอบ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วชนิดเจลที่เติมสารเติมแต่ง PPy, Pss และไม่เติมสารเติมแต่ง จำนวน 14 รอบ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ชนิดเจล (12 V/4Ah) ด้วยการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ

ลำดับ	ขั้นตอน
1	อัดประจุ (1A/14.8 V/5 hr/25 °C)
2	พัก (10 hr)
3	คายประจุ (3.0 A/9.60 V/25 °C)
4	ทำซ้ำลำดับที่ 1 ถึง 3 เป็นจำนวน 13 ครั้ง
5	ทำซ้ำลำดับที่ 1 ถึง 4 เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 40 และ 55 องศาเซลเซียส

2.5 การทดสอบอายุการใช้งาน

เครื่อง Battery Charge/Discharge and Data Processing Control System User Manual Version 1.0 แสดงในรูปที่ 8 นำมาใช้ทดสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จำนวน 200 รอบ ที่อัตราการคายประจุสูง สำหรับแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ทดสอบ ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ แสดงในรูปที่ 16 ประกอบด้วย ก) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมชนิดเจล (เจลแบตเตอรี่) ที่ใช้ตามท้องตลาด ข) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมชนิด น้ำที่ใช้ตามท้องตลาด และ ค) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมชนิดเจล (เจลแบตเตอรี่) โดยใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้กลั่นขึ้นแต่ละสูตรมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิดนี้มีขนาดและค่าความจุของแบตเตอรี่เท่ากัน(ตามข้อมูลบนตัวแบตเตอรี่) สำหรับขั้นตอนการทดสอบ แบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ขั้นตอนการทดสอบสำหรับเจลแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าและที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ (12 V/7Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 1 ชั่วโมง

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 199 ครั้ง

ก)



ข)



ค)



รูปที่ 16 แบตเตอรี่ที่ทดสอบอายุการใช้งาน ขนาด 7 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ประกอบด้วย ก) เจลแบตเตอรี่ที่ใช้ตาม
ท้องตลาด, ข) แบตเตอรี่แบบน้ำที่ใช้ตามท้องตลาด และ ค) แบตเตอรี่เจลที่พัฒนาขึ้น

2.6 การทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง (Self discharge)

1. หลังการทดสอบอัตราการคายประจุตามข้อ 2.1 เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทำการบันทึกค่าความต่างศักย์เริ่มต้น
2. ทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ทุกๆ 1 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยอุณหภูมิที่เก็บแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 30 ± 3 องศาเซลเซียส
3. เทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เป็นร้อยละความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ดังแสดงในตารางที่ 7
4. เมื่อครบกำหนด 3 เดือนนำแบตเตอรี่มาทำการทดสอบหาประสิทธิภาพหลังการเก็บรักษาตามตารางที่ 8

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่

Capacity	12V OCV
100%	$V > 13.0 \text{ V}$
90%	$12.80 < V < 13.00$
80%	$12.65 < V < 12.80$
70%	$12.50 < V < 12.65$
60%	$12.35 < V < 12.50$
50%	$12.20 < V < 12.35$
40%	$12.05 < V < 12.20$
30%	$11.90 < V < 12.05$
20%	$11.75 < V < 11.90$
10%	$11.60 < V < 11.75$

ตารางที่ 10 ขั้นตอนการทดสอบหลังการเก็บรักษาเพื่อทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ (12 V/4Ah) แบบการคายประจุจนหมด (100% DOD) ที่อัตราเร็ว 10 ชั่วโมง

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

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรก การศึกษาผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์เหลว ส่วนที่สองเป็น การศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นโดยปราศจากสารเติมแต่งและผลของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจล อิเล็กโทรไลต์ สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิเอคริลาไมด์ พอลิพีร์โรล สารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลลิน การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การทดสอบสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

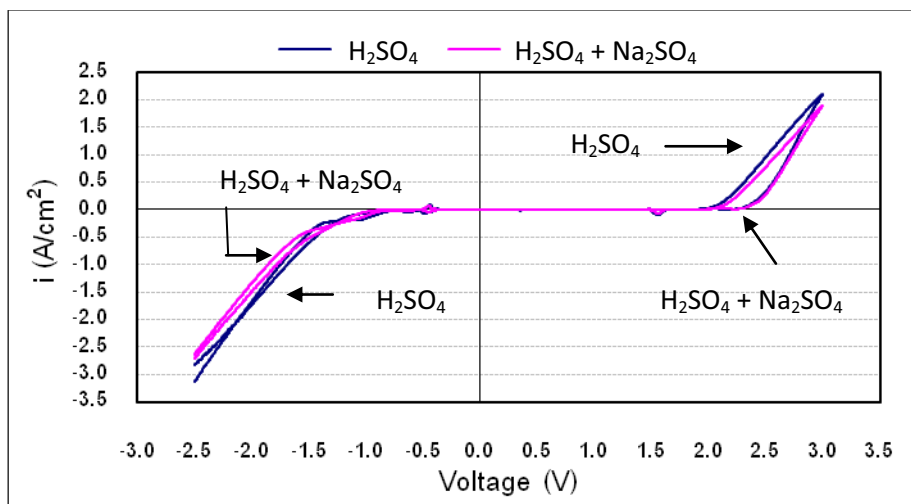
1. การศึกษาผลของสารเติมแต่งซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์เหลว

การทดลองนี้ให้ความสำคัญต่อสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตเนื่องจากมีหลากหลายงานวิจัยทำการศึกษาสารเติมแต่งนี้และให้ผลการทดสอบต่างๆที่ดี โดยพบว่า การเติมโซเดียมซัลเฟตแบบผงลงใน อิเล็กโทรไลต์ปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยป้องกันการใช้หมดไปของ SO_4^{2-} ซึ่งเป็นอันตรายเมื่อแบตเตอรี่จ่ายไฟโดยไม่มีกรด การใส่โซเดียมซัลเฟตเป็นการเสริม SO_4^{2-} โดยไม่ทำให้ตะกอนกร่อน นอกจากนี้ยังพบว่าโซเดียมซัลเฟตช่วยเพิ่มความสามารถในการประจุไฟฟ้ากลับอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตปริมาณ 13.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (1 %wt) ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับเติมลงในอิเล็กโทรไลต์ที่มีผู้วิจัยแล้วค้ำดัน เปรียบเทียบกับการไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตเท่านั้น เนื่องจากวิธีเป็นวิธีที่ง่ายต่อการปรับปรุงสมรรถนะของแบตเตอรี่มากที่สุด

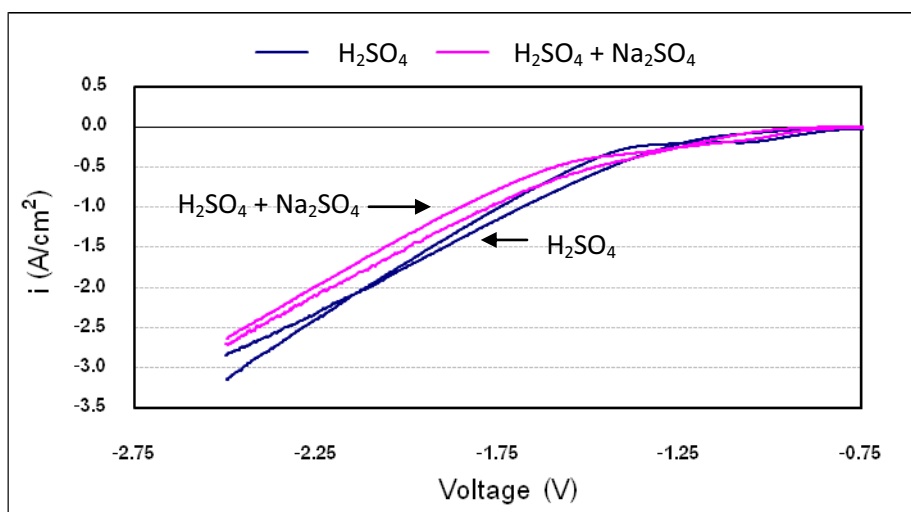
- ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

การทดสอบในส่วนนี้ทำเพื่อศึกษาปฏิกิริยาโดยรวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่และให้ความสำคัญกับการเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนหรือปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำหนักตัวเอง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญเกิดในขณะแบตเตอรี่อัดประจุไฟฟ้ามากเกินไปและเป็นสาเหตุทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลง โดยการศึกษาเปรียบเทียบอิเล็กโทรไลต์เหลว 2 ชนิด คือ อิเล็กโทรไลต์เหลวที่ไม่เติมโซเดียมซัลเฟตและเติมโซเดียมซัลเฟตปริมาณ 13.25 กรัมต่อลิตร จากผลการวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์เหลวด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีดังแสดงในรูปที่ 17 ก) พบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่พิจารณาได้จากช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของอิเล็กโทรไลต์เหลวที่ไม่เติมโซเดียมซัลเฟตและเติมโซเดียมซัลเฟตนั้นให้พิกของการเกิดปฏิกิริยาที่ตรงกันนั่นเอง นอกจากนั้นหากพิจารณาในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจน ที่ช่วงความต่างศักย์ -2.5 V ถึง -0.75 V และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนในช่วงความต่างศักย์ 1.75 V ถึง 3 V พบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนช้าขึ้นและลดอัตราการเกิดลงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 17 ข) และ ค) จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้ลดการสูญเสียน้ำหนักของแบตเตอรี่ได้เล็กน้อย

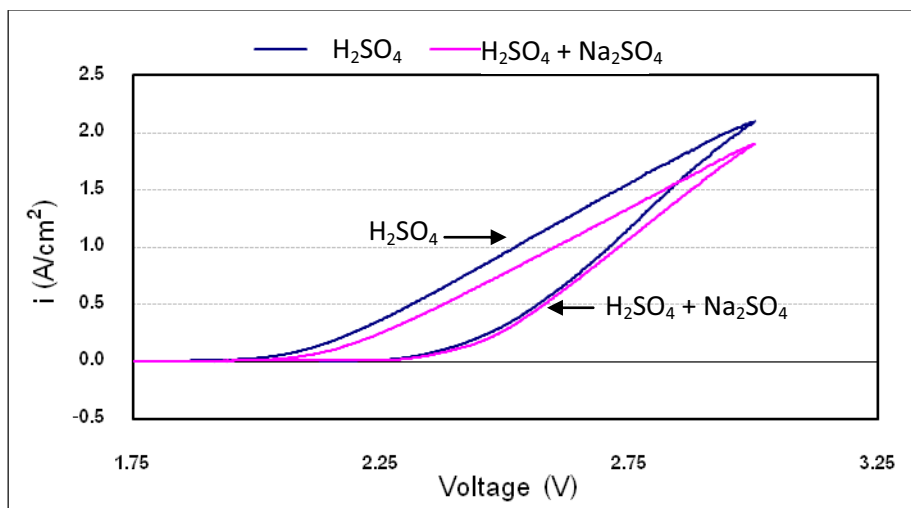
ก)



ข)



ค)

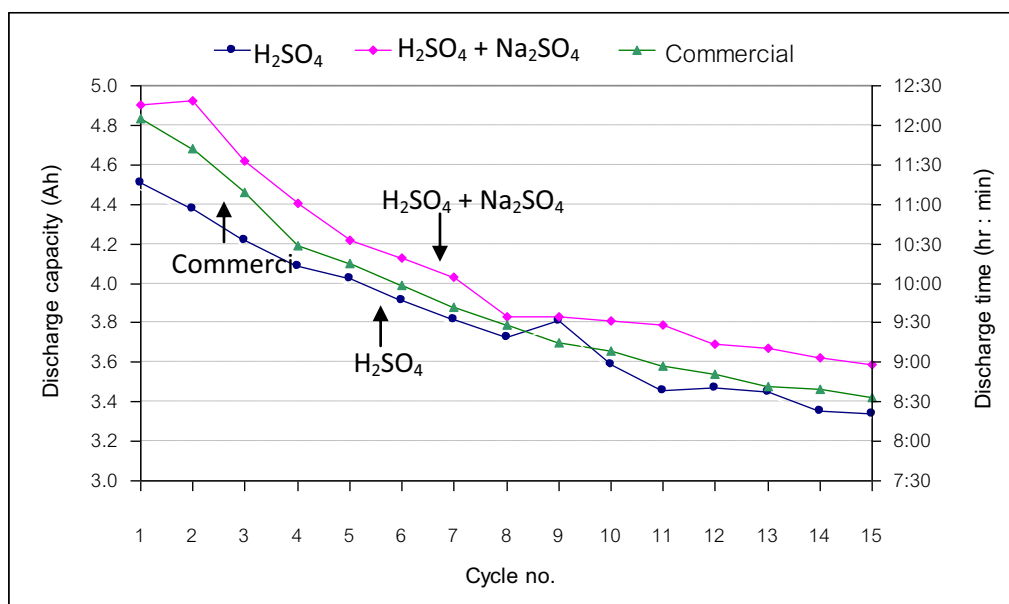


รูปที่ 17 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบกรดซัลฟูริกที่ไม่เติมและเติมโซเดียมซัลเฟตช่วง ก) -2.5 V ถึง 3.0 V ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

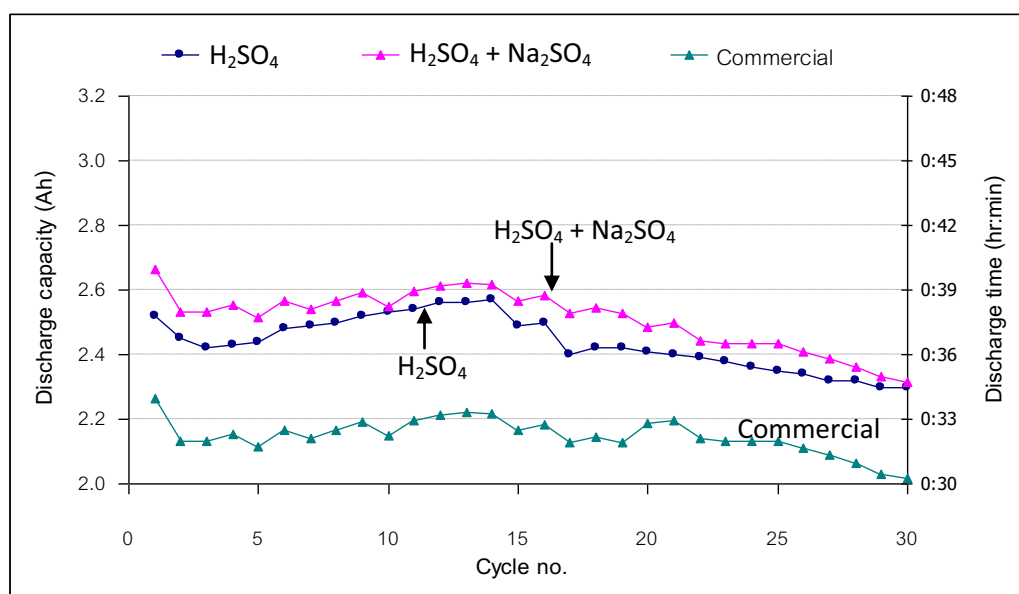
- ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

ผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลวที่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่ใช้ในการค้าแสดงดังรูปที่ 18 พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวทั้ง 3 ให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ลดลงเมื่อจำนวนรอบการทดสอบของแบตเตอรี่เพิ่มมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากความเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่เมื่อใช้งานมากขึ้น แบตเตอรี่ที่ใช้ในทางการค้าให้ค่าความจุการคายประจุของแบตเตอรี่มากกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ทดลองที่ไม่มีสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต เมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (18 ก) และให้ค่าความจุของแบตเตอรี่น้อยกว่าเมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (18 ข) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าอาจมีการเติมสารเติมแต่งบางชนิดลงในอิเล็กโทรไลต์ แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาแบตเตอรี่ที่ใช้ทดลองที่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต พบว่าให้ค่าความจุการคายประจุเฉลี่ยที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ทางการค้าและแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต โดยให้ค่าความจุเฉลี่ยมากขึ้นร้อยละ 6.85 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.35 เมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และให้ค่าความจุเฉลี่ยมากขึ้นร้อยละ 3.29 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.55 เมื่อทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) เทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เนื่องมาจากการทดสอบนี้เป็น การทดสอบที่การคายประจุจนหมด ดังนั้นการเติมโซเดียมซัลเฟตจะช่วยป้องกันการใช้หมดไปของ SO_4^{2-} เมื่อมีการคายประจุเป็นจำนวนมาก และช่วยทำให้การอัดประจุย้อนกลับดีขึ้น ดังนั้นการคายประจุในรอบถัดไปจึงสามารถทำงานได้ดีกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตนั่นเอง อีกทั้งการเติมโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์เป็นการเพิ่มไอออนให้กับระบบอาจทำให้ค่าการนำโปรตอนดีขึ้น จึงส่งผลให้ลดค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ภายในแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้แบตเตอรี่ที่มีการเติมสารโซเดียมซัลเฟตให้ค่าความจุ ในการคายประจุได้มากขึ้นและมีประสิทธิภาพดีกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต จึงกล่าวได้ว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตที่ปริมาณ 13.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ช่วยเพิ่มสมรรถนะของแบตเตอรี่ให้สูงขึ้น

ก)



ข)



รูปที่ 18 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต แบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร และแบตเตอรี่ที่ใช้ในการค้า ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง

2. ผลการศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นโดยปราศจากสารเติมแต่งและผลของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์

เนื่องจากการเติมโซเดียมซัลเฟตให้ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ดีขึ้น ดังกล่าวข้างต้น ในส่วนของการศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์จึงมีการนำสารโซเดียมซัลเฟตมาเป็นสารเติมแต่งในทุกสูตร

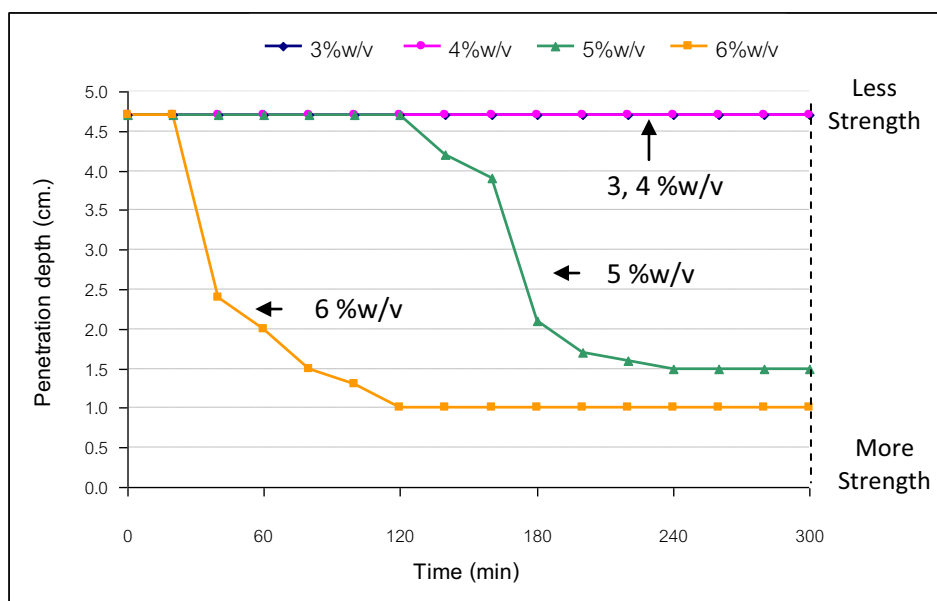
2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเจลอิเล็กโทรไลต์

2.1.1 ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล

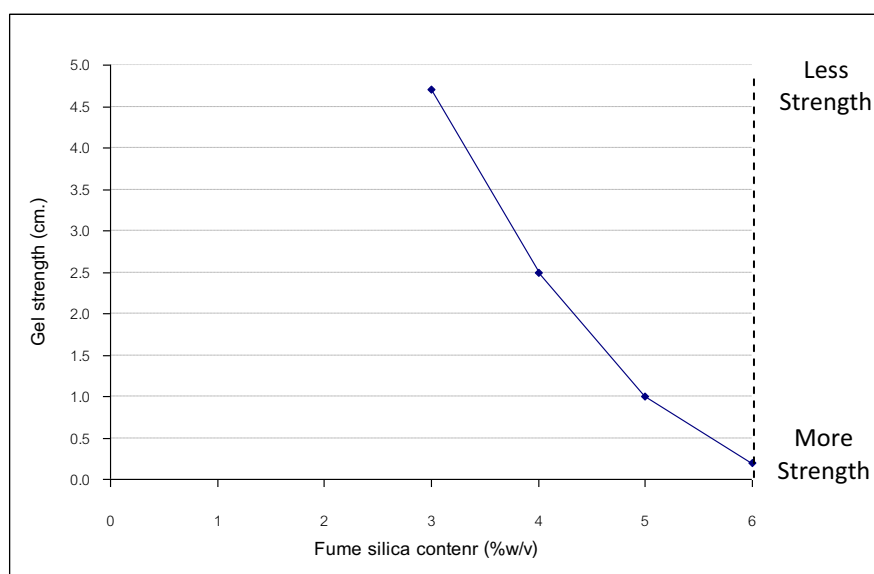
เวลาในการเกิดเจลมีความสำคัญต่อกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่ กล่าวคือ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติแบบไทโซโทรปี (thixotropy) เจลจะมีความหนืดและความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีแรงกระทำต่อเจล แต่จะกลับมาเหลวอีกครั้งเมื่อมีแรงมากระทำกับเนื้อเจล หากเจลอิเล็กโทรไลต์มีระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้นจะส่งผลให้กระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่นั้นทำได้ยาก เนื่องจากเนื้อเจลจะมีความหนืดมาก มีการแข็งตัวก่อนที่จะเติมลงในแบตเตอรี่ได้หมด ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเซลล์แบตเตอรี่ขึ้นทำให้ลดสมรรถนะของแบตเตอรี่ลง แต่ในทางกลับกันหากเจลที่เตรียมได้มีระยะเวลาในการเกิดเจลที่นานมากหรือความแข็งของเจลต่ำ ถึงแม้ว่าจะง่ายต่อการเติมลงแบตเตอรี่ แต่จะส่งผลให้เจลแบตเตอรี่ที่ได้อาจยังมีน้ำกรดรั่วซึมอยู่ มีรายงานว่าระยะเวลาในการเกิดในช่วง 3 – 4 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาในการเกิดเจลที่เหมาะสมสำหรับเจลแบตเตอรี่ ในการทดลองนี้จะแบ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลเป็น 2 ปัจจัย คือ ผลของปริมาณฟลูออรีนที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจลและผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล สำหรับสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่นำมาพิจารณา

- ผลของปริมาณฟลูออรีนที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

จากผลการทดสอบปริมาณฟลูออรีนที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจลแสดงดังรูปที่ 19 พบว่าปริมาณฟลูออรีนที่ใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล (gelling agent) ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล โดยเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟลูออรีน 3 และ 4 %w/v ให้ระยะเวลาในการเกิดเจล มากกว่า 5 ชั่วโมง ในขณะที่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟลูออรีน 5 และ 6 %w/v ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลประมาณ 3 ชั่วโมง 20 นาที และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณของฟลูออรีนมาก จะส่งผลให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วลดลงเร็วขึ้น เนื่องจากฟลูออรีนปริมาณมากจะทำให้การสร้างเจลในชั้นการสร้างพันธะไฮโดรเจนมีโอกาสการเกิดได้มากกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณของฟลูออรีนน้อย นอกจากนี้ปริมาณฟลูออรีนยังส่งผลต่อความแข็งของเจล โดยการเพิ่มปริมาณฟลูออรีนจะส่งผลให้เจลมีความแข็งมากขึ้น ดังรูปที่ 20 ซึ่งแสดงระยะทางที่ลูกตะกั่วเคลื่อนที่ได้หลังทิ้งเจลอิเล็กโทรไลต์ไว้เป็นระยะ 1 วัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเจลที่เตรียมจากปริมาณฟลูออรีนมากจะให้โครงสร้างของเจลจับตัวอย่างหนาแน่น มีความพรุนของเจลต่ำ (gel porosity) ในขณะที่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟลูออรีนน้อย จะให้โครงสร้างที่มีการจับตัวกันอย่างหลวมๆ มีความพรุนสูง ดังนั้นเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟลูออรีนมากจึงทำให้เจลมีความแข็งมากตามเช่นกัน



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟุ้งซิลิกาต่างๆ

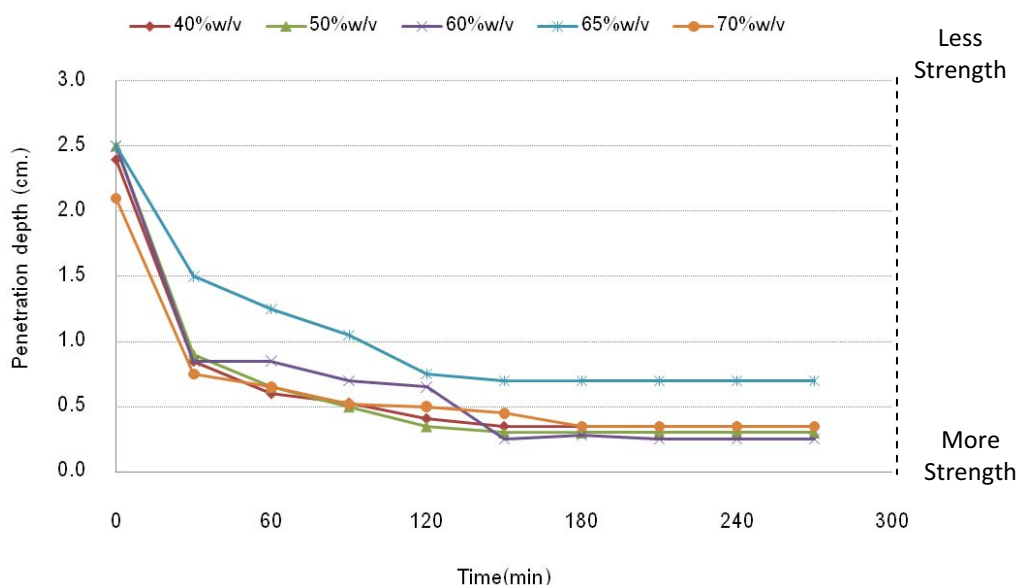


รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลที่ปริมาณฟุ้งซิลิกาต่างๆ

- ผลของกรดซัลฟิวริกที่มีต่อเวลาในการเกิดเจล

ผลการทดลองใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกแตกต่างกันตั้งแต่ 40,50,60,65 และ 70 %w/v ผสมกับ ฟุ้งซิลิกาความเข้มข้น 6% w/v ด้วยอัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เมื่อ

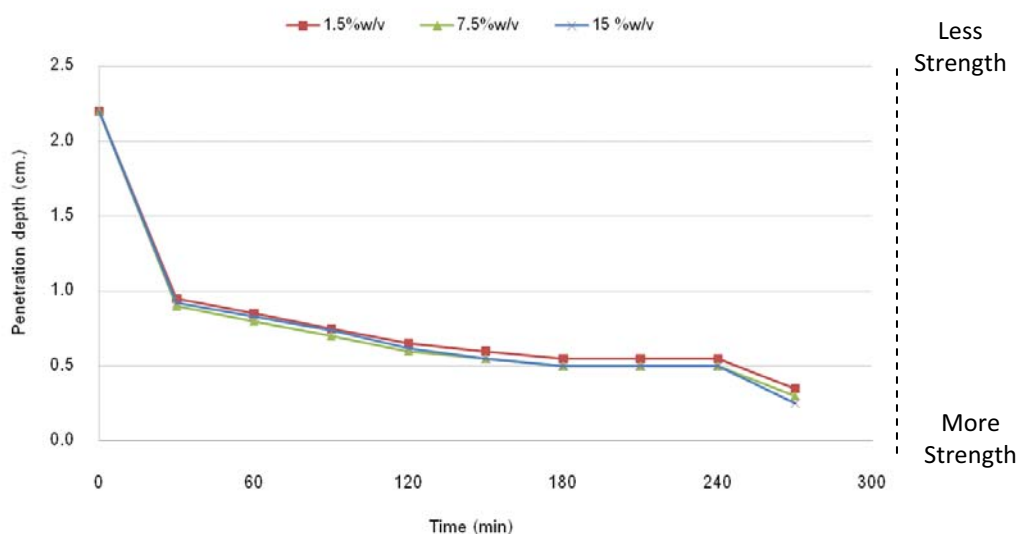
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลา ดังรูปที่ 21 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณของฟลูมซิลิกา กล่าวคือ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกมาก ระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วจะน้อย เนื่องจากผลของโปรตอนจากกรดซัลฟิวริกทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสของหมู่ซิลานอล (Si-OH) บนผิวของซิลิกา และทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้โครงสร้างเจลอิเล็กโทรไลต์จับตัวอย่างแน่น และมีความแข็งแรง



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกต่างๆ

- ผลของโซเดียมซัลเฟตที่มีต่อเวลาในการเกิดเจล

ผลการทดลองใช้ความเข้มข้นโซเดียมซัลเฟตแตกต่างกันที่ 1.5, 7.5 และ 15 %w/v ผสมกับฟลูมซิลิกา ความเข้มข้น 5% w/v ด้วยอัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 22 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลา พบว่าโซเดียมซัลเฟตที่เติมลงไปมีผลต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่ว น้อยมาก หากมีความเข้มข้นของเกลือสูง จะส่งผลให้เจลอิเล็กโทรไลต์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าศักย์ซีต้า และแรงผลักระหว่างโมเลกุลของซิลิกาที่อยู่ติดกันมีค่าลดลง ในทางปฏิบัตินิยมเติมโซเดียมซัลเฟตในปริมาณน้อย จากตารางที่ 6 พบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตไม่ส่งผลต่อเวลาในการเกิดเจล แต่มีส่วนช่วยในการฟื้นฟูสมรรถภาพของแบตเตอรี่หลังจากคายประจุจำนวนมาก เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไอออนร่วม (Common ion effect) ของโซเดียมซัลเฟตที่จำกัดการละลายของตะกั่วซัลเฟต

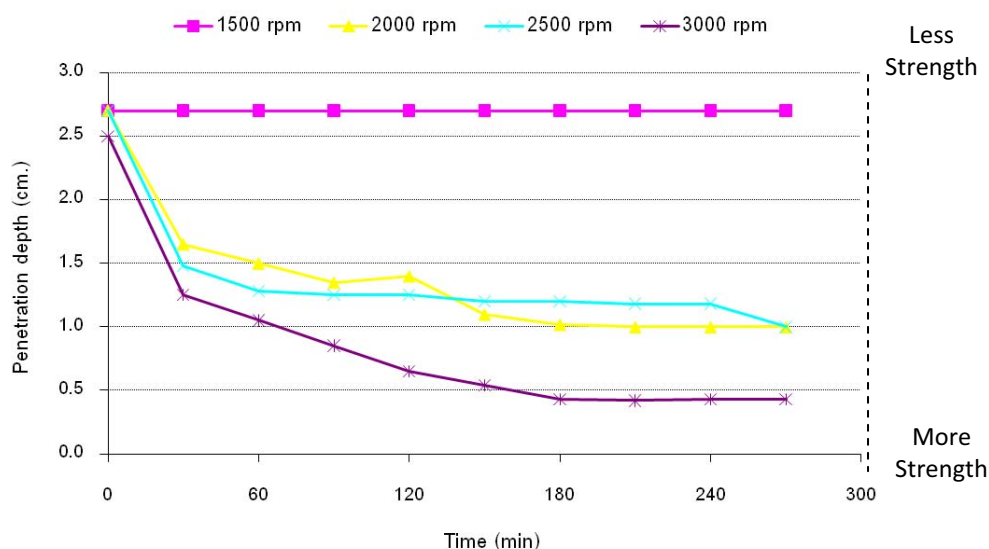


รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ความเข้มข้น โซเดียมคลอไรด์ต่างๆ

จากรูปที่ 22 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลา พบว่าโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไป มีผลต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่ว น้อยมาก หากมีความเข้มข้นของเกลือสูง จะส่งผลให้เจลอิเล็กโทรไลต์มีความ แข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าศักย์ซีต้า และแรงผลักระหว่างโมเลกุลของซิลิกาที่อยู่ติดกันมีค่าลดลง ในทางปฏิบัตินิยมเติม โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณน้อย

- ผลของความเร็รรอบในการกวนที่มีต่อเวลาในการเกิดเจล

ผลของความเร็รรอบในการกวนอิเล็กโทรไลต์ต่อเวลาการเกิดเจลที่ความเร็ว 1500, 2000, 2500 และ 3000 รอบต่อนาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 65 %w/v กับฟุ้งซิลิกาความเข้มข้น 5 %w/v ใช้เวลาในการกวน 10 นาที พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลา แสดงในรูปที่ 23



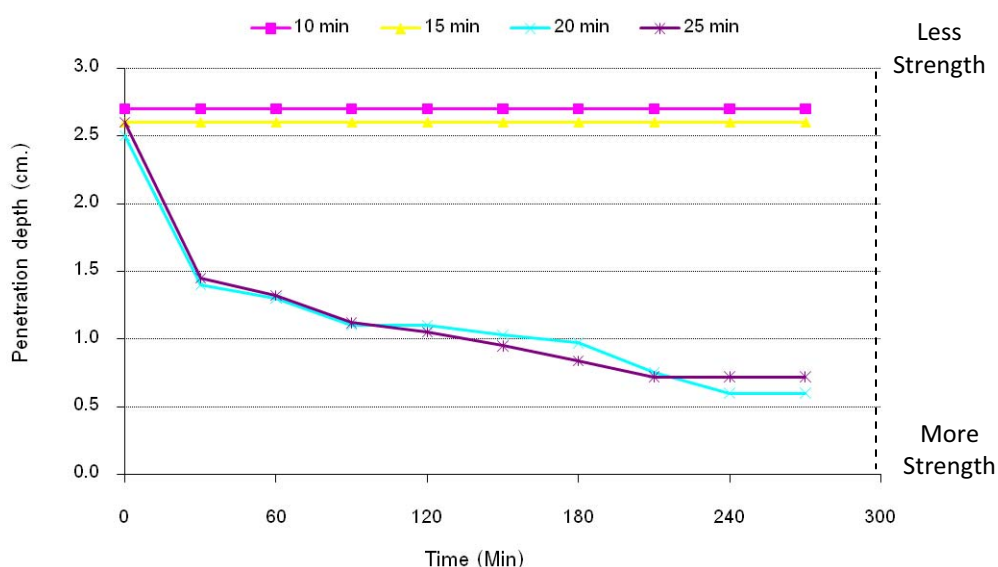
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ของเวลาในการเกิดเจลที่ความเร็วรอบในการกวนต่างๆ

จากรูปที่ 23 พบว่าที่ความเร็วในการกวน 1500 รอบต่อนาที ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่ว แต่เมื่อผ่านไปหลายวันพบการแข็งตัวของเจลเพิ่มมากขึ้นจึงกล่าวได้ว่าเจลที่เตรียมได้มีระยะเวลาในการกลายเป็นเจลมากกว่า 4 ชั่วโมง ส่วนความเร็วรอบในการกวนอื่นมีการลดลงของระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่ว โดยที่การกวนด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาที พบว่ากราฟมีความชันมาก แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วที่น้อยลง เมื่อเวลาผ่านไปจึงกล่าวได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ ที่เตรียมได้นั้นเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วและมีความแข็งแรงมากที่สุด ส่วนการกวนที่ความเร็ว 2000 และ 2500 รอบต่อนาที พบว่าความชันกราฟมีค่าใกล้เคียงกันและมีความชันน้อยกว่าที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที

นอกจากนี้จากการสังเกตลักษณะเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียม พบว่าที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยที่ 1500 รอบต่อนาที เจลอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเหลวมีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันพืช ที่ 2000 รอบต่อนาที มีลักษณะจับตัวเป็นก้อนคล้ายวุ้นมะพร้าวบริเวณตรงกลางแต่รอบนอกมีลักษณะเหลว ที่ 2500 รอบต่อนาที เจลอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะคล้ายกาวเป้งเปี้ยกแต่เหลวกว่าเล็กน้อย ที่ 3000 รอบต่อนาที อิเล็กโทรไลต์ที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับที่ 2500 รอบต่อนาที ความหนืดที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่มากขึ้น

- ผลของเวลาในการกวนที่มีต่อเวลาในการเกิดเจล

จากการศึกษาผลของเวลาในการกวนที่มีต่อเวลาการเกิดเจล โดยการผสมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 65 %w/v กับพุ่มซิลิกาความเข้มข้น 5 %w/v ด้วยความเร็ว 1500 รอบต่อนาที พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลา แสดงในรูปที่ 24 และตารางที่ 11 สรุปผลเวลาในการเกิดเจล



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ของเวลาในการเกิดเจลที่เวลาในการกวนต่างๆ

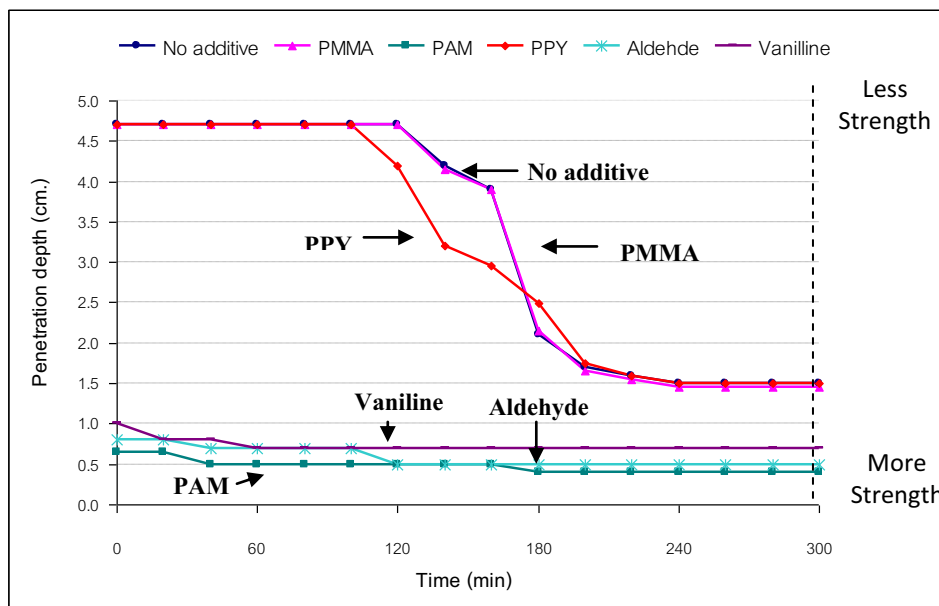
จากรูปที่ 24 พบว่าการกวนระยะเวลา 10 และ 15 นาที ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่ว แต่เมื่อผ่านไปหลายวันพบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์มีความแข็งตัวเพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีเวลาในการเกิดเจลมาก กว่า 4 ชั่วโมง ส่วนการกวนระยะเวลา 20 และ 25 นาที พบว่าลักษณะการแข็งตัวของเจลอิเล็กโทรไลต์ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ เจลมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นอย่างคงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลงความแข็งขึ้นอีก

นอกจากนี้จากการสังเกตลักษณะเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียม พบว่าที่ระยะเวลาในการกวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เจลอิเล็กโทรไลต์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ที่เวลาในการกวน 10 นาที เจลอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเหลวมีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันพืช ที่เวลาในการกวน 15 นาที เจลอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะจับตัวเป็นก้อนคล้ายวุ้นมะพร้าว ในขณะที่การกวนเป็นเวลา 20 และ 25 นาที เจลอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะคล้ายกาวแป้งเปือก ความหนืดที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจน

- ผลของชนิดสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

ในส่วนนี้จะให้ความสำคัญต่อชนิดของสารเติมแต่ง เพื่อใช้ในการหาแนวโน้มชนิดและปริมาณการเติมสารเติมแต่งที่เหมาะสมสำหรับเติมลงในแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงเลือกศึกษาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา 5%w/v เพราะให้ระยะเวลาในการเกิดเจลภายใน 5 ชั่วโมง ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลง และสารเติมแต่งที่ความเข้มข้น 0.5 %w/v ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่ค่อนข้างมากสำหรับการเติมสารเติมแต่งและคาดว่าจะสามารถเห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากชนิดของสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการเกิดเจลได้ชัดเจน สำหรับสารเติมแต่งต่างๆ ที่ในการทดลอง ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิเอคริลาไมด์ พอลิพีวีโรล สารประกอบแอลดีไฮด์ และวานิลลิน ผลการทดลองแสดงดังรูป 25 พบว่าสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลและพอลิพีวีโรลส่งผลต่อความแข็งของเจลเล็กน้อย แต่

อย่างไรก็ตามยังคงให้ค่าระยะเวลาในการเกิดเจลในช่วง 3 ชั่วโมงเช่นเดิม ในขณะที่สารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลลิน และ พอลิแอคริลาไมด์ ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล โดยทำให้เจลแข็งตัวเร็วขึ้นและมีความแข็งตัวเพิ่มขึ้นมาก



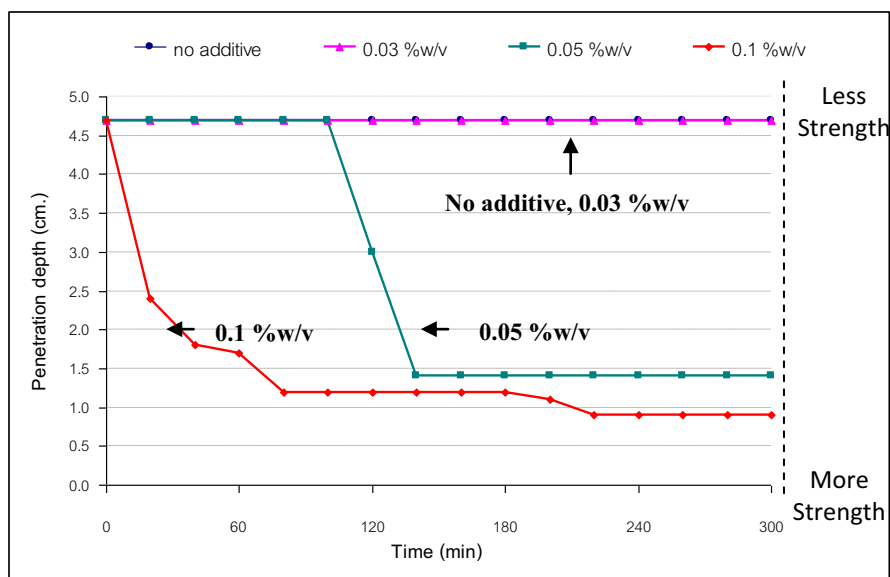
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณพูนซิลิกา 5 %w/v สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ 0.5 %w/v

- ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการเกิดเจล

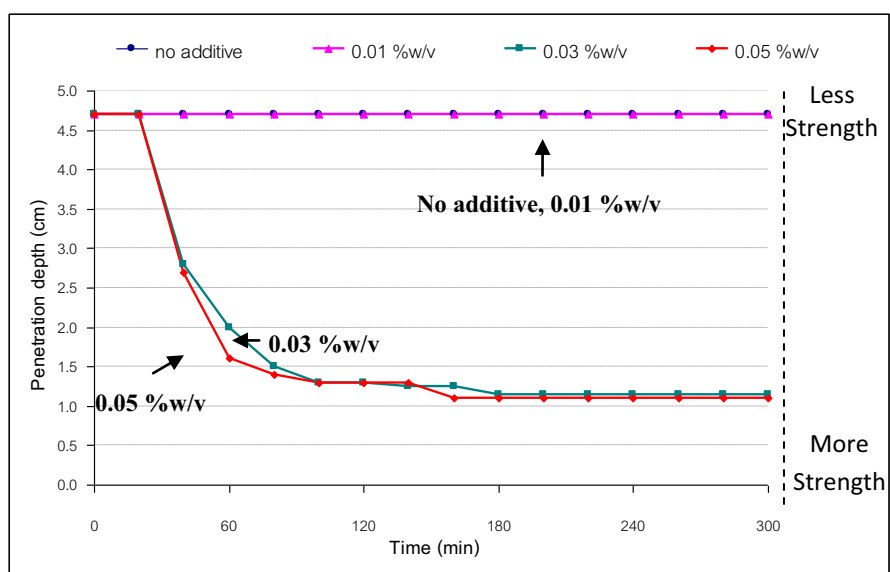
จากผลการทดสอบในข้อ 2.1 พบว่ามีเพียง สารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลลิน และ พอลิแอคริลาไมด์ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล ดังนั้นในส่วนนี้จะพิจารณาเพียงสาร 3 ชนิดนี้เท่านั้น

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเติมแต่งวานิลลินและสารประกอบแอลดีไฮด์ต่างๆ ที่ปริมาณซิลิกา 4%w/v ดังแสดงในรูปที่ 26 ก) และ 26 ข) ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดเพิ่มมากขึ้นระยะเวลาในการเกิดเจลจะสั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้เจลมีความแข็งตัวเพิ่มขึ้นและสารประกอบแอลดีไฮด์จะให้ความแข็งแรงมากกว่าสารเติมแต่งวานิลลินดังแสดงในรูปที่ 27

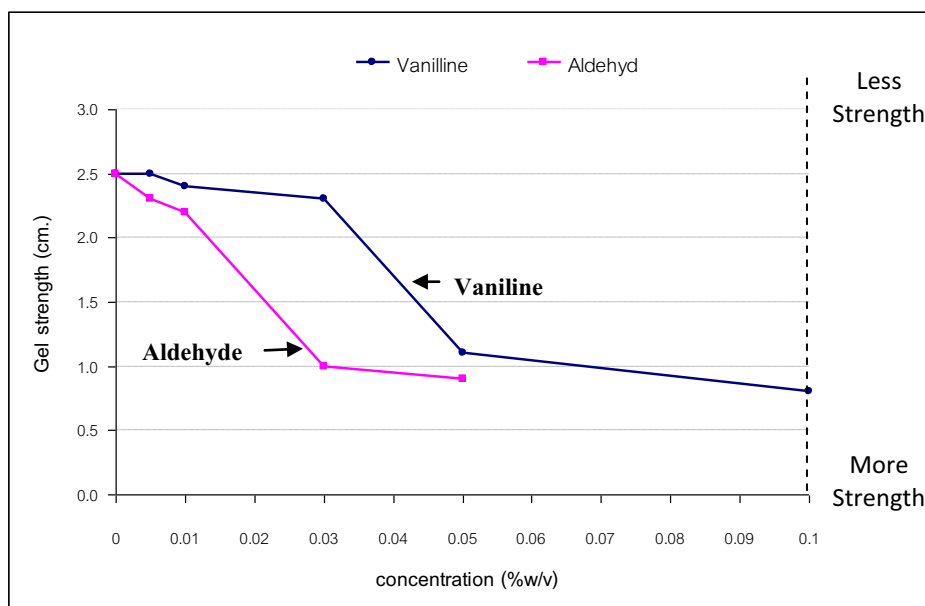
ก)



ข)



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกตะกั่วกับเวลาที่ปริมาณฟลูมซิลิกา 4 %w/v ที่ปริมาณสารเติมแต่งต่างๆ ก) วานิลลิน ข) สารประกอบแอลดีไฮด์



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเจลของสารเติมแต่ง วานิลินและสารประกอบแอลดีไฮด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

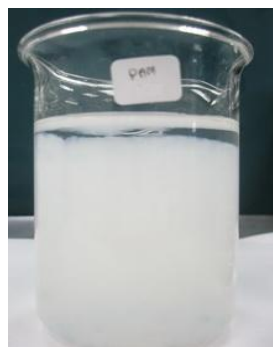
ในส่วนของการเติมแต่งพอลิเอคริลาไมด์ พบว่าจะมีตะกอนเกิดขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งมากกว่าหรือเท่ากับ 0.03 %w/v ลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพูนซิลิกา 3 %w/v ดังแสดงในรูปที่ 28 และสารเติมแต่งพอลิเอคริลาไมด์จะให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้นมาก ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการสร้างพันธะของหมู่ไฮโดรเจนในพอลิเอคริลาไมด์กับอนุภาคซิลิกา นั้นดังกล่าวว่าการเติมพอลิเอคริลาไมด์ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสัดส่วนของปริมาณพูนซิลิกาส่งผลเพียงลดระยะเวลาในการเกิดเจลลดลง ในขณะที่เมื่อเติมพอลิเอคริลาไมด์ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนของปริมาณพูนซิลิกาการสร้างพันธะของหมู่ไฮโดรเจนในพอลิเอคริลาไมด์กับอนุภาคซิลิกาจะเกิดได้มาก ในขณะที่การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกรดกับอนุภาคซิลิกาในช่วงการสร้างเจลเกิดขึ้นน้อยลง จึงส่งผลทำให้เกิดเป็นตะกอนแทนการเกิดเป็นเนื้อเจลนั่นเอง สรุปผลการทดสอบหาระยะเวลาของการเกิดเจลที่ปริมาณต่างๆของสารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลิน และ พอลิเอคริลาไมด์ กับปริมาณพูนซิลิกาที่ 3, 4 และ 5 %w/v แสดงดังตารางที่ 11

ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลมากกว่า 3 ชั่วโมง เนื่องจากในช่วงระยะเวลาในการเกิดเจลนี้ เนื้อเจลที่ได้จะไม่หนืดมากนัก สามารถเติมเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ได้ดีซึ่งจะได้กล่าวในส่วนของการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ถัดไป ดังนั้น ปริมาณพูนซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์สูงสุดที่ 5 %w/v สำหรับปริมาณของสารเติมแต่งพอลิพีไรโรลและพอลิมิลาทเมทาคริเลตสามารถเติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ได้ทุกความเข้มข้น เนื่องจากไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจล ในส่วนของสารเติมแต่งสารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลิน และ พอลิเอคริลาไมด์ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลที่แสดงดังตารางที่ 11 ส่วนสภาวะที่แรงงาคือสูตรเจลที่สามารถเติมลงในอิเล็กโทรไลต์ได้

ก.)



ข.)



รูปที่ 28 เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 3 %w/v สารเติมแต่งพอลิแอคริลาไมด์ 0.03 %w/v ก) ด้านบน ข) ด้านข้าง

ตารางที่ 11 สรุประยะเวลา (ชั่วโมง:นาที) ในการเกิดเจล

					Gelling time (hr:min)					
Conditions	Sulfuric acid (%w/v)	Speed mixing (rpm)	Mixing time(min)	Additives (%w/v)	Fume silica (%w/v)					
					3	4	5	6		
Blank	40	3000	10	-	-	-	-	3:20		
	50	3000	10		-	-	-	3:20		
	≈ 60	1500	10		-	-	>4	-		
			15		-	-	>4	-		
			20		-	-	4	-		
			25		-	-	3:20	-		
		2000	10		>4	>4	3:20	2		
		3000			-	-	3	2		
		4000			>4	>4	2:20	-		
	70	3000	10		-	-	-	2		
	Aldehyde	≈ 60	2000		10	0.005	>4	>4	2:20	-
						0.01	>4	>4	-	-
0.03				>4		1:40	-	-		
0.05				>4		1:20	-	-		
0.1				>4		-	-	-		
0.5				>4		-	G	-		
Vanilline	≈ 60	2000	10	0.005	>4	>4	3	-		
				0.01	>4	>4	-	-		
				0.03	>4	>4	-	-		
				0.05	>4	2:20	-	-		
				0.1	>4	1:20	-	-		
				0.5	>4	-	G	-		
PAM	≈ 60	2000	10	0.005	>4	1	G	-		
				0.01	2	G	-	-		
				0.03	P	G	-	-		
				0.05	P	-	-	-		
				0.1	P	-	-	-		
				0.5	P	-	G	-		

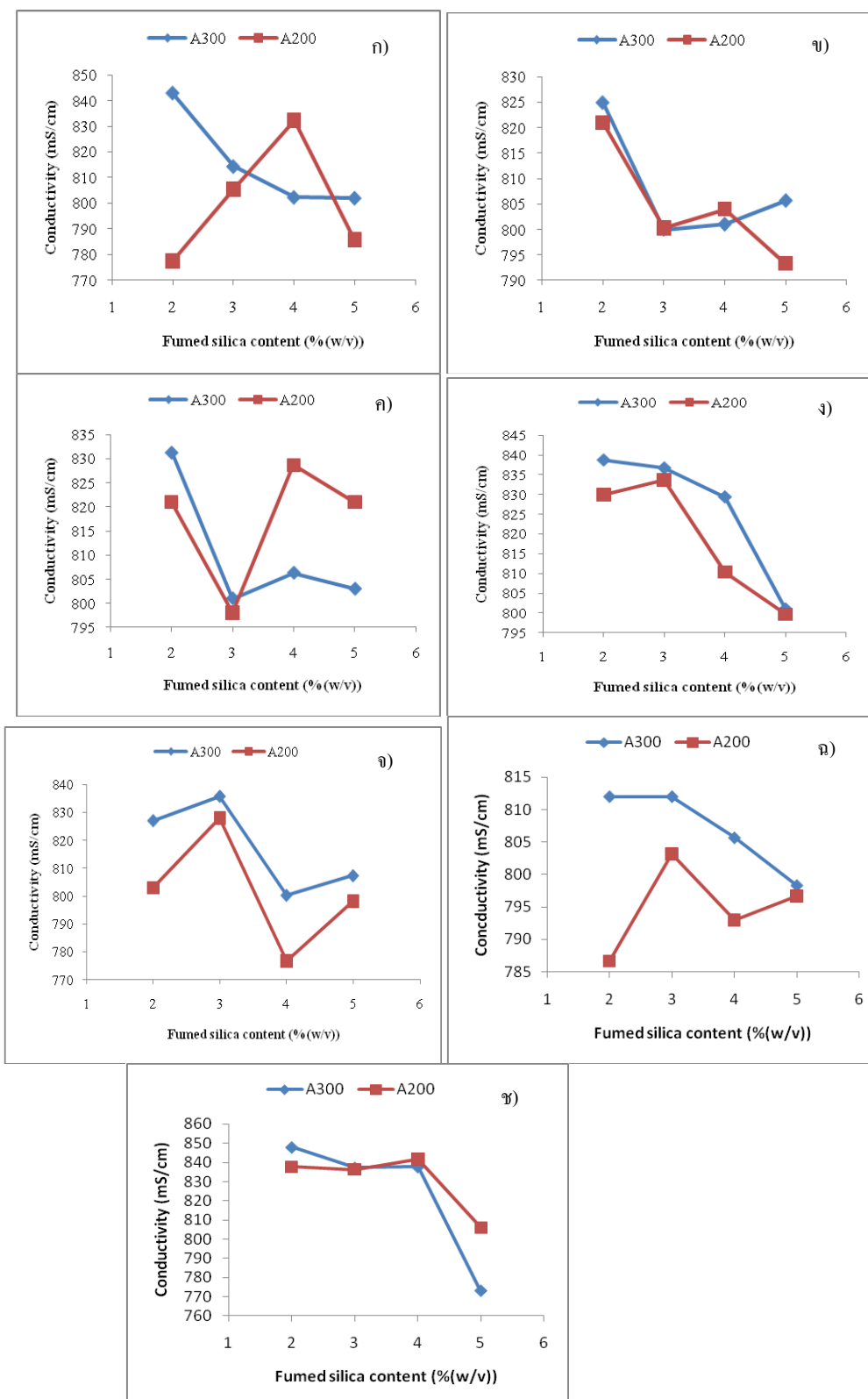
"G" refers to gel-form electrolyte and "P" refers to precipitation

2.1.2 ผลการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์สูตรต่างๆที่เตรียมขึ้นด้วยการวัดค่าการนำไฟฟ้า

การวัดค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์จะทำการทดสอบควบคู่กับการสังเกตลักษณะของเจลอิเล็กโทรไลต์และการทดสอบสมรรถนะของเจลแบตเตอรี่ สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้การวัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อเลือกองค์ประกอบของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุม ซึ่งเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงน่าจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่สูงหรือมีสมรรถนะของเจลแบตเตอรี่ที่ดี

ผลของค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่งใดๆโดยเปรียบเทียบระหว่างเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร (A300) และ 12 นาโนเมตร (A200) ที่ปริมาณพูนซิลิกาดังแต่ร้อยละ 2-5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลดังแสดงดังรูป 29 ก) จะสังเกตได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่งที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร ปริมาตรร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด ขณะที่เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่งที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ปริมาตรร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุด แต่ทั้งนี้อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ปริมาณพูนซิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีลักษณะการตกตะกอนและแยกชั้นระหว่างของแข็งและของเหลว ทำให้การวัดค่าการนำไฟฟ้าอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ จึงจะเลือกพิจารณาที่ปริมาณพูนซิลิกาดังแต่ร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ปริมาตรร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงรองลงมา โดยมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยที่ขุ่นหนืด ขณะที่ปริมาณพูนซิลิการ้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็นเจลโสมบวมแต่ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตรมีค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อปริมาณพูนซิลิกาเพิ่มสูงขึ้น โดยอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะที่เหลวกว่าเมื่อเทียบกับพูนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ต่อมาทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งต่างๆ ขณะที่ผลของค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แสดงดังรูป 29 ข) โดยอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ปริมาณพูนซิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุดทั้งพูนซิลิกาขนาด 7 และ 12 นาโนเมตร แต่ยังคงมีลักษณะการแยกชั้นระหว่างของเหลวและของแข็ง ขณะที่พูนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร ปริมาตรร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงรองลงมา ใกล้เคียงกับอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ปริมาตรพูนซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และมีลักษณะที่เป็นของเหลวหนืดเช่นเดียวกับการไม่เติมสารเติมแต่ง ต่อมาพิจารณารูป 29 ค) ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุดและมีสภาพเป็นของเหลวหนืด คือ อิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ปริมาตรร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เช่นเดียวกับอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง Pss+IL ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรแสดงดังรูป 29 ข)

จากผลดังรูปที่ 29 และตารางที่ 12 จะสังเกตได้ว่าผลของค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งต่างกันจะให้ผลที่แตกต่างกัน โดยปริมาณพูนซิลิกาที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจะให้ผลการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุดเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะแยกชั้นระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งลักษณะโดยส่วนมากจะเป็นของเหลวทำให้อิเล็กตรอนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าในของเหลวหนืด ขณะที่ผลของค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวหนืดในอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิดให้ผลที่ต่างกัน เนื่องจากอาจเป็นผลจากความหนืดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 29 ผลของค่าการนำไฟฟ้าของ เจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละสูตรที่ปริมาณพูนซิลิกาต่างๆ ทั้งพูนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร (A300) และ 12 นาโนเมตร (A200); ก.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง, ข.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง PPy,

ค.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS, ง.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง Pss, จ.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง IL, ฉ.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง PPy+IL ข.) เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง Pss+IL

ขณะที่อิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง Pss, IL และ PPy+IL ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ใช้ปริมาณฟุ้งชิลิการ้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด ดังรูปที่ 21 ง-ฉ) ตามลำดับ ซึ่งผลของค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ฟุ้งชิลิกาต่างๆสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12 ทั้งนี้สารเติมแต่งที่มีผลทำให้อิเล็กโทรไลต์มีความหนืดมากขึ้น ได้แก่ สารเติมแต่ง Pss และ IL

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยของค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์สูตรต่างๆ ที่ปริมาณฟุ้งชิลิกาที่แตกต่างกัน

สารเติมแต่ง	ฟุ้งชิลิกา							
	2 % (w/v)		3 % (w/v)		4 % (w/v)		5 % (w/v)	
	A300 (7 nm)	A200 (12 nm)	A300 (7 nm)	A200 (12 nm)	A300 (7 nm)	A200 (12 nm)	A300 (7 nm)	A200 (12 nm)
ไม่เติมสารเติมแต่ง	843	777	814	805	802	832	802	786
0.01% (w/v) Ppy	825	821	800	800	801	804	806	793
0.01% (w/v) PEDOT:PSS	831	821	801	798	806	829	803	821
0.01% (w/v) Pss	839	830	837	834	829	810	801	800
0.01% (w/v) IL	827	803	836	828	800	777	807	798
0.01% (w/v) PPy +0.01% (w/v) IL	812	787	812	803	806	793	798	797
0.01% (w/v) Pss +0.01% (w/v) IL	848	838	837	836	838	841.67	773	806

หมายเหตุ หน่วยของค่าการนำไฟฟ้า คือ มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (mS/cm)

ตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ยของค่าการนำไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ปริมาณความเข้มข้นสารเติมแต่งที่ต่างกัน

ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง	ชนิดของสารเติมแต่ง	พุ่มซิลิกา	
		3 % (w/v) A300	4 % (w/v) A200
0.005 % (w/v)	PPy	782	773
	PEDOT:PSS	772	796
	Pss	804	772
	IL	780	769
	PPy+IL	778	773
	Pss+IL	777	777
0.01% (w/v)	PPy	800	804
	PEDOT:PSS	801	829
	Pss	837	810
	IL	836	801
	PPy+IL	812	793
	Pss+IL	837	842
0.02% (w/v)	PPy	774.67	773
	PEDOT:PSS	782	782
	Pss	789	791
	IL	779	785
	PPy+IL	790	759
	Pss+IL	783	777

จากผลข้างต้นจึงทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าและลักษณะของเจล โดยเลือกใช้พุ่มซิลิกาขนาด 7 ปริมาตรร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพุ่มซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ปริมาตรร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากมีสภาพเป็นของเหลวหนืดน่าจะเป็นเหมาะสำหรับการนำไปบรรจุลงในแบตเตอรี่ได้ง่ายและสามารถกลายเป็นเจลได้เมื่อบรรจุลงในแบตเตอรี่ ซึ่งผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่อค่าการนำไฟฟ้าเป็นดังแสดงในตารางที่ 13 ซึ่งผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละชนิด คือที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงสุดในแต่ละชนิดสารเติมแต่งแสดงด้วยตัวอักษรสีแดงในตารางที่ 13 ดังนั้นที่ความเข้มข้นนี้เป็นการเติมที่เหมาะสมสำหรับการเติมสารเติมแต่งในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ส่งผลให้ได้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูง โดยเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง Pss และ IL ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าการไม่เติมสารเติมแต่ง แต่ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าการวัดค่าการนำไฟฟ้าเป็นวิธีหนึ่งในการตรวจสอบหาสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมที่และจะให้ค่าความจุไฟฟ้า จึงทำการยืนยันด้วยการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

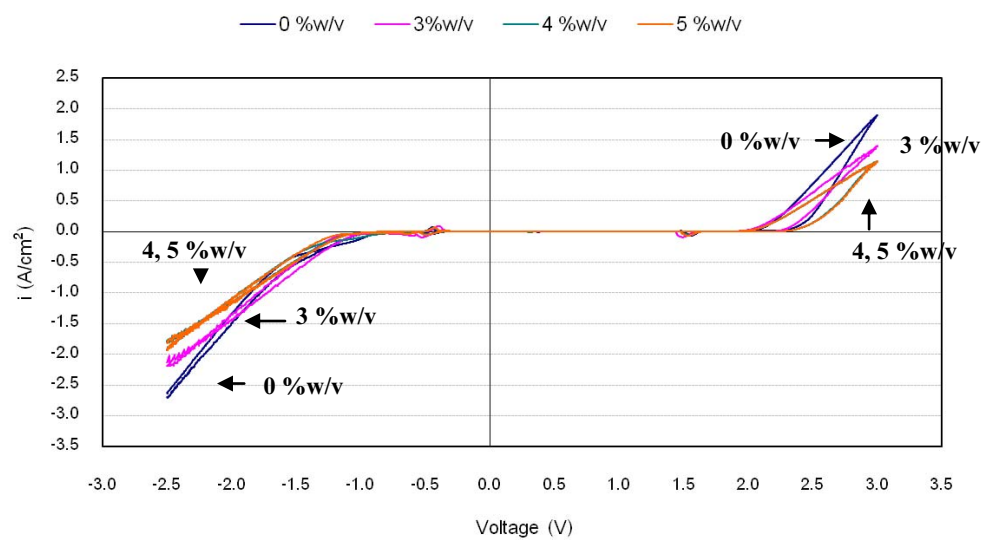
2.1.3. ผลการวิเคราะห์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

จากผลการทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 1 แล้วนั้น ทำการเลือกเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ค่าระยะเวลาในการเกิดเจลมากกว่าเท่ากับ 3 ชั่วโมงมาวิเคราะห์การสูญเสียภายในแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

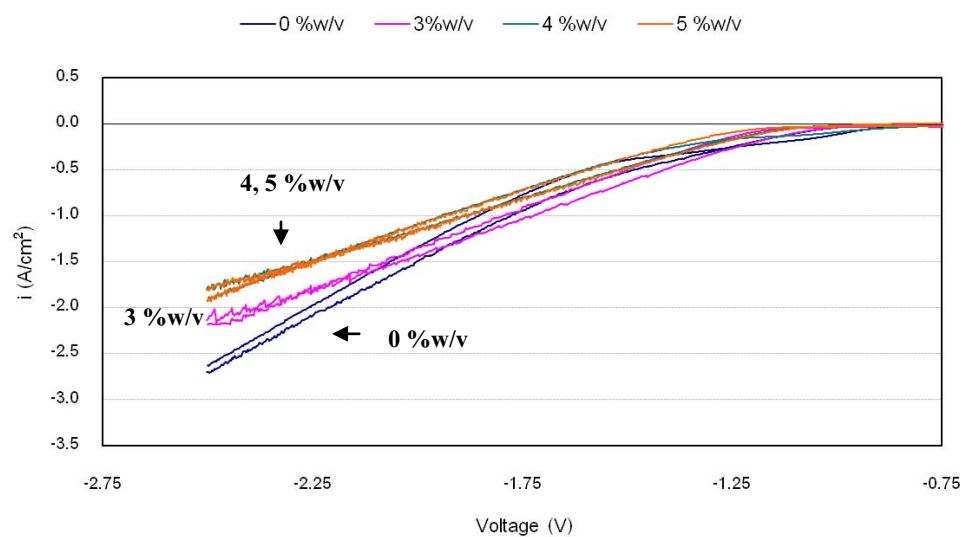
- ผลของปริมาณพุ่มซิลิกา

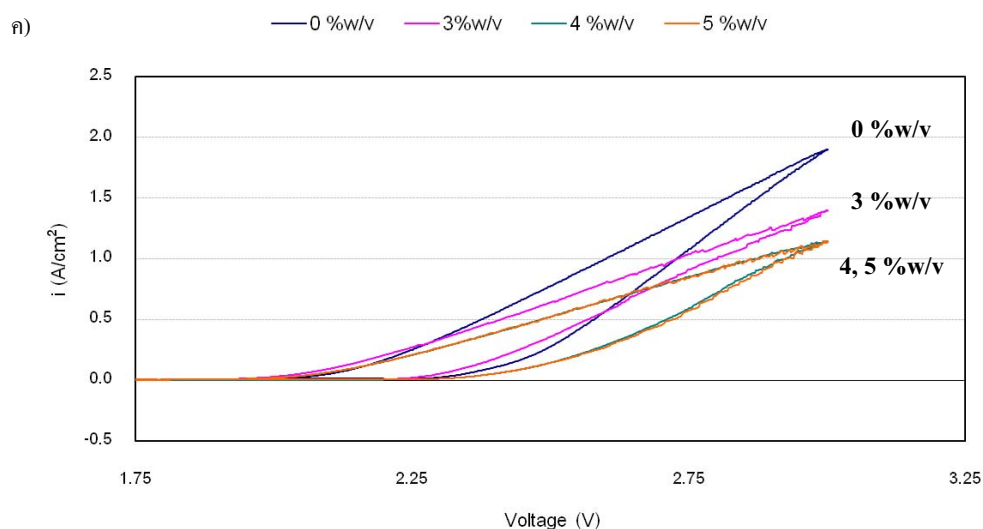
จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีเปรียบเทียบอิเล็กโทรไลต์เหลว (0%w/v) และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากปริมาณพุ่มซิลิกาดังกล่าว พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่พิจารณาได้จากช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของอิเล็กโทรไลต์เหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์นั้นให้พิกของการเกิดปฏิกิริยาที่ตรงกันนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 30 ก) โดยหากพิจารณาในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจน ในช่วงความต่างศักย์ -2.5 V ถึง -0.75 V และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนในช่วงความต่างศักย์ 1.75 V ถึง 3 V พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 30 ข) และ ค) โดยปริมาณพุ่มซิลิกามากขึ้นจะช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนให้ลดลง พิจารณาปริมาณพุ่มซิลิกา 0, 3 และ 4 %w/v แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณถึงปริมาณหนึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนคงที่พิจารณาได้จากปริมาณพุ่มซิลิกาที่ 4 และ 5 %w/v ซึ่งจะให้อัตราปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่ากัน จึงอาจกล่าวได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ช่วยลดการสูญเสียของแบตเตอรี่

n)



o)

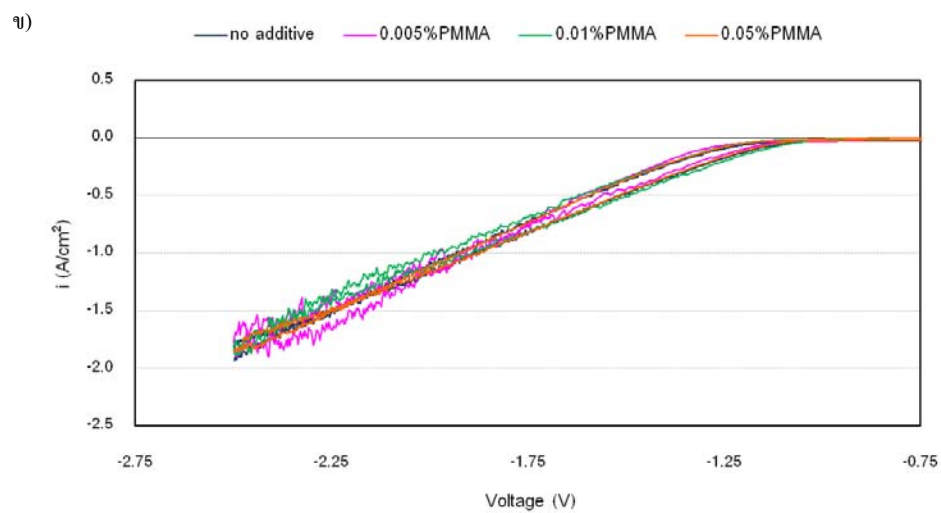
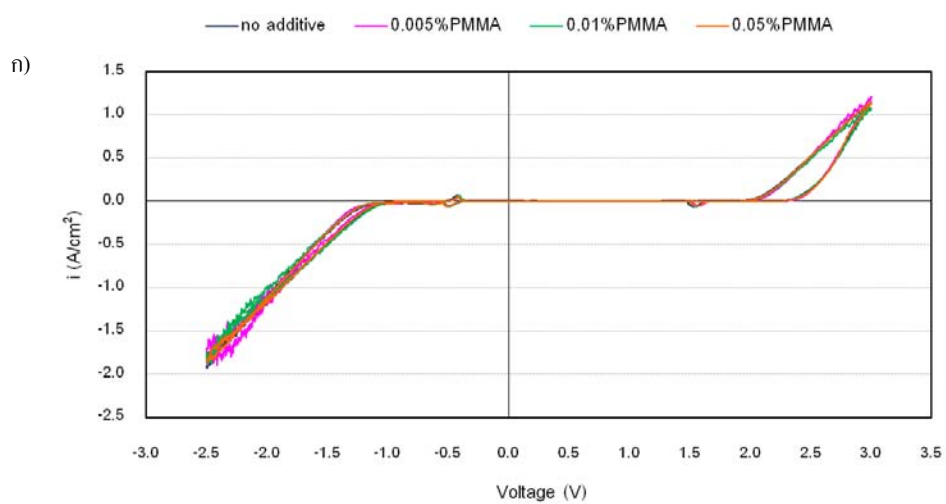


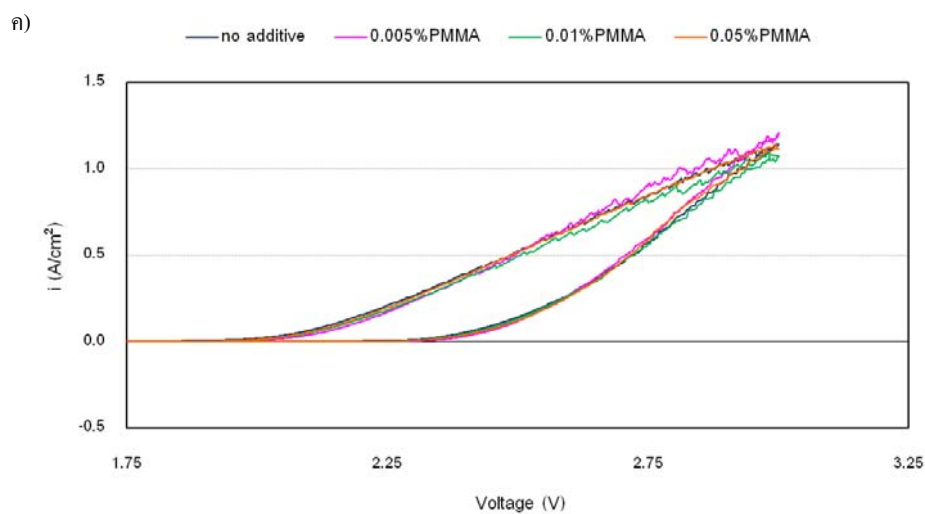


รูปที่ 30 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ก) เปรียบเทียบปริมาณฟลูออโรซิลิกาต่างๆช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

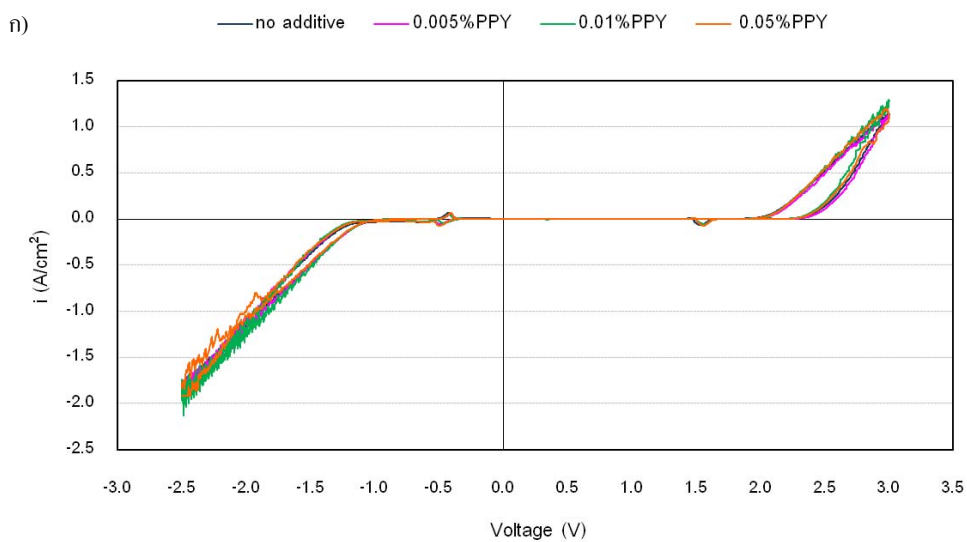
- ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง

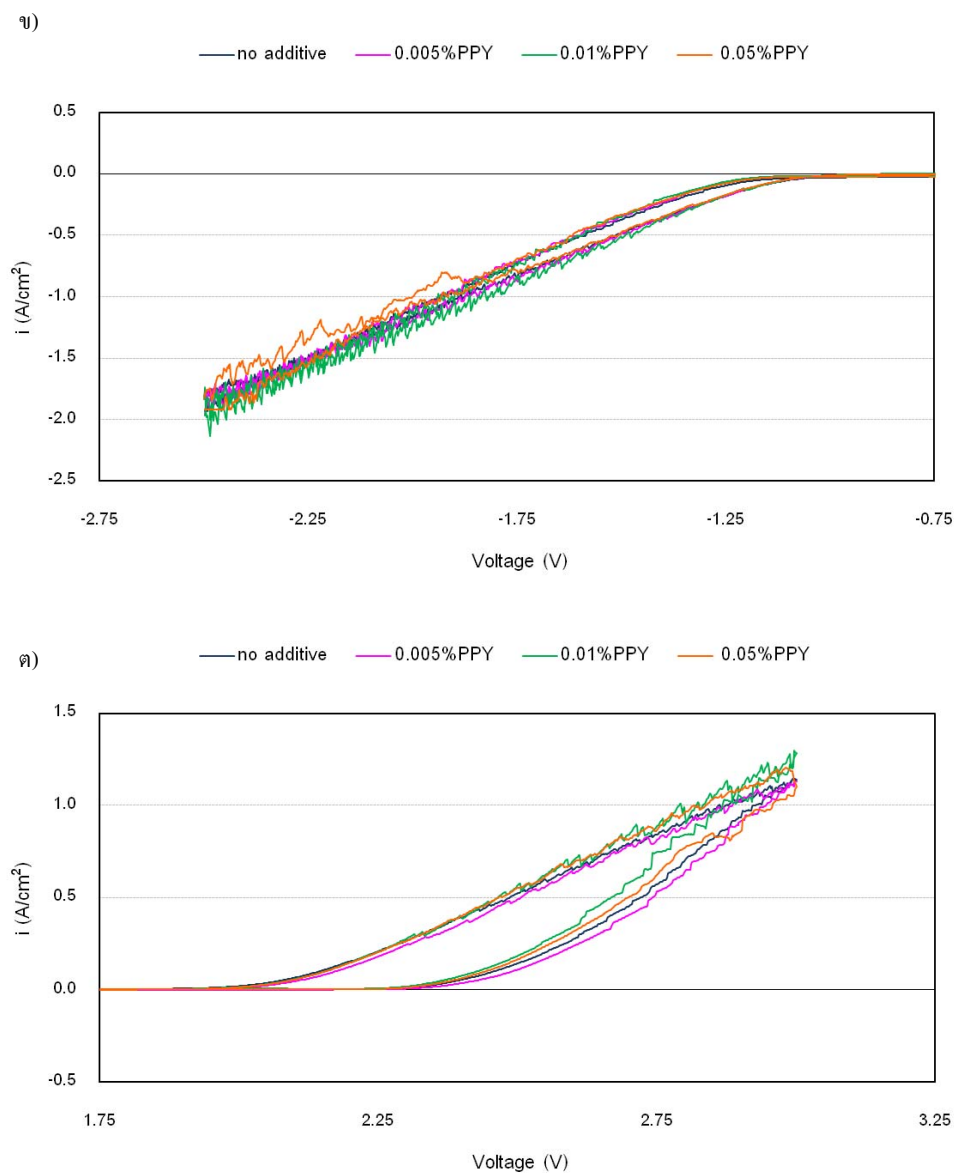
จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีเปรียบเทียบเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งต่างๆ ประกอบด้วยสารประกอบแอลดีไฮด์ วานิลลิน พอลิเมทิลเมทาคริเลต และ พอลิพีร์โรล พบว่าสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ดังรูปที่ 31 ถึง 34 เมื่อพิจารณาในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.75 V ถึง 1.75 V เส้นกราฟของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่งและเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งชนิดและปริมาณต่างๆ นั้นให้พิกของการเกิดปฏิกิริยาที่ตรงกันและไม่มีพิกอื่นในช่วงความต่างศักย์ดังกล่าว ในส่วนของสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ พอลิพีร์โรล นอกจากจะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่แล้ว ยังไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 31 และ 32 ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ พอลิพีร์โรลตามลำดับ ในขณะที่สารเติมแต่งสารประกอบแอลดีไฮด์และวานิลลินส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจนพิจารณาได้จากในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจน ที่ช่วงความต่างศักย์ -2.5 V ถึง -0.75 V และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนในช่วงความต่างศักย์ 1.75 V ถึง 3 V พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมจากสารเติมแต่งทั้งสองช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 33, 34 ข) และ ค) ของสารประกอบแอลดีไฮด์และวานิลลินตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งทั้งสองมากขึ้นจะช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนให้ลดลงที่จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดีไฮด์และวานิลลินลงในเจลอิเล็กโทรไลต์จะช่วยลดการสูญเสียของแบตเตอรี่มากขึ้น



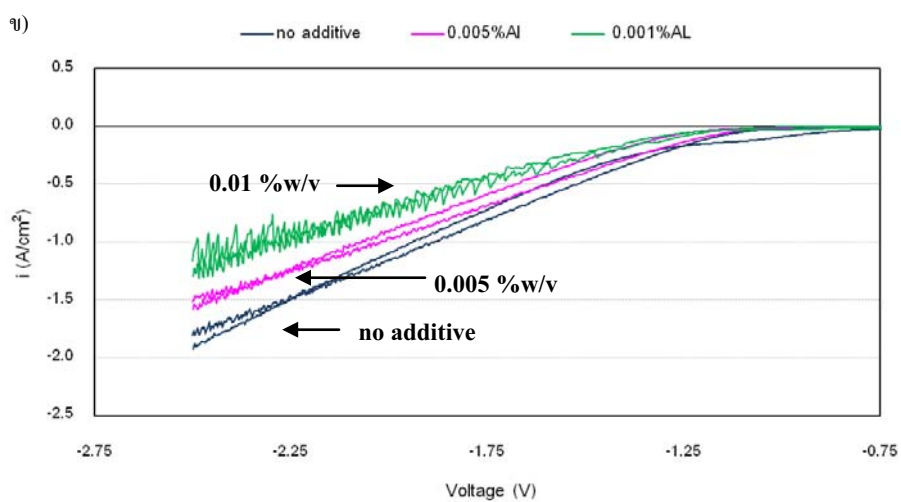
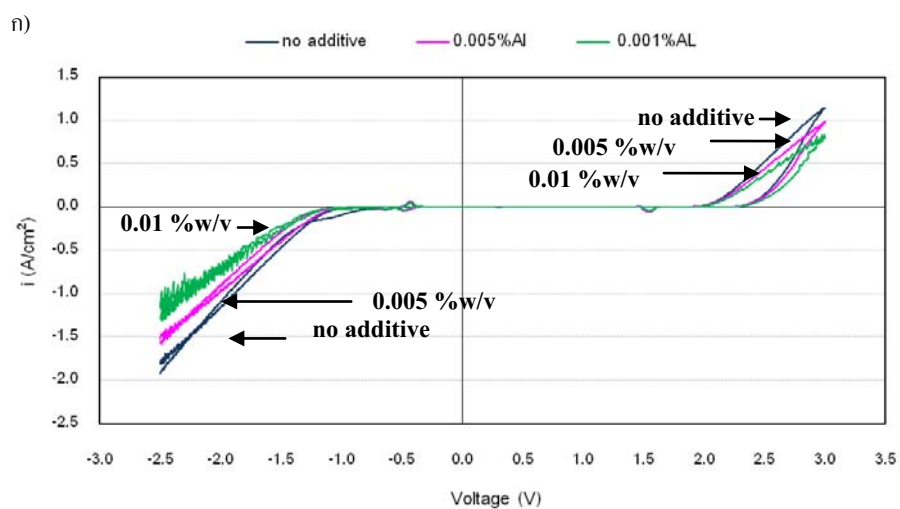


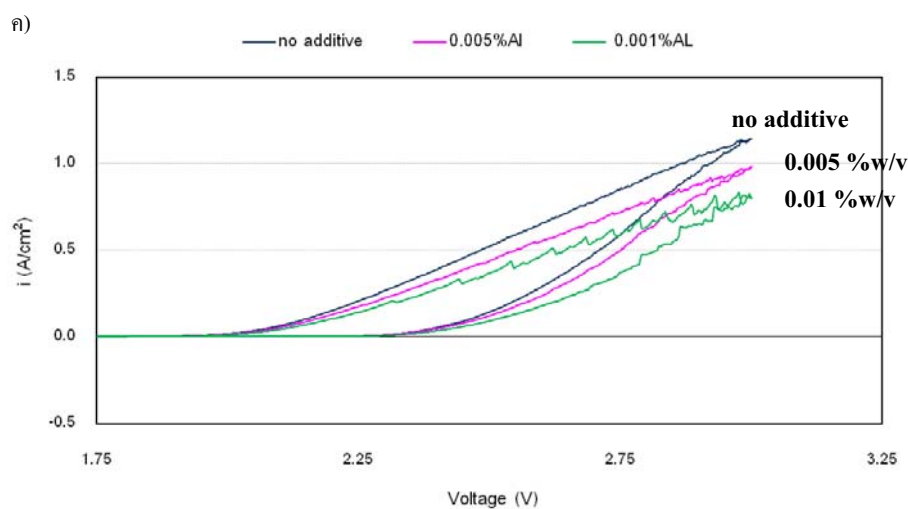
รูปที่ 31 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต ต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก



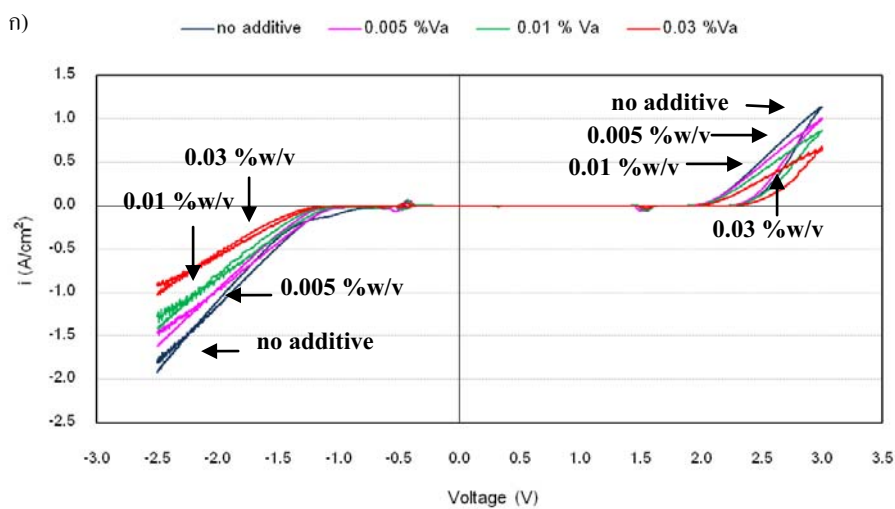


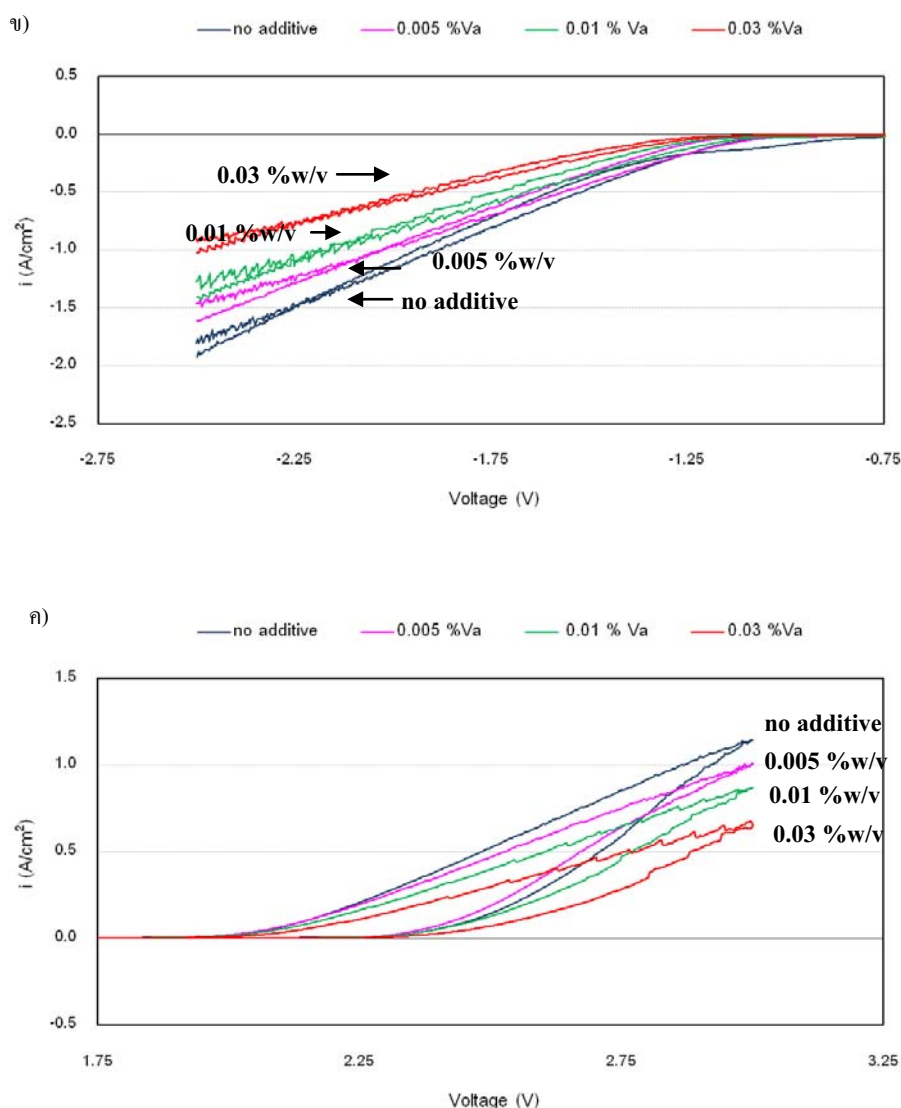
รูปที่ 32 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เปรียบเทียบปริมาณ พอลิพีร์โรลต่างๆ ในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 5 %w/v ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก





รูปที่ 33 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อมีการเติมสารประกอบแอลคิลไฮด์ปริมาณต่างๆ ของเจลลี่เล็กโพรไลด์ที่เตรียมจากพุ่มชิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก



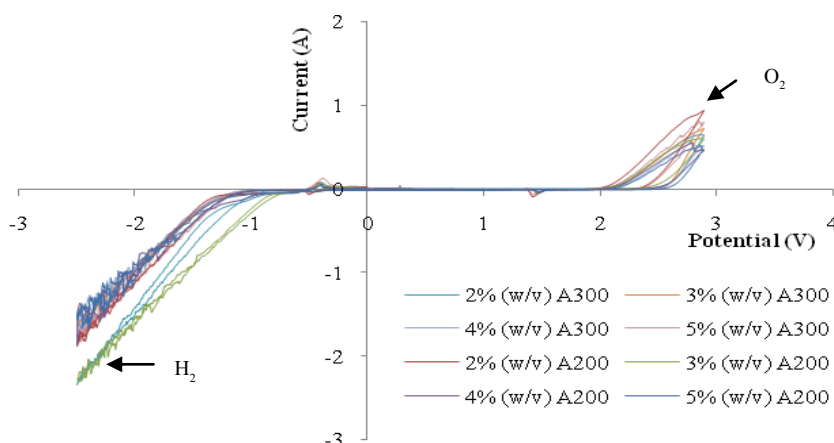


รูปที่ 34 ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (CV) ช่วง -2.5 V ถึง 3.0 V ที่อัตราเร็ว 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อมีการเติมวานิลินปริมาณต่างๆ ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา 4 %w/v ข) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านลบ และ ค) ภาพขยายความต่างศักย์ด้านบวก

ต่อมาทำการเปรียบเทียบผลการสูญเสียน้ำของเจลอิเล็กโทรไลต์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีที่ขนาดอนุภาคพุ่มซิลิกา 7 นาโนเมตร (A300) และ 12 นาโนเมตร (A200) และที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยแบ่งตามชนิดของสารเติมแต่ง คือ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง, เติมนสารเติมแต่ง PPy, เติมนสารเติมแต่ง PEDOT:PSS, เติมนสารเติมแต่ง PSS, เติมนสารเติมแต่ง IL, เติมนสารเติมแต่ง PPy+IL, เติมนสารเติมแต่ง PSS +IL

เจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่ง

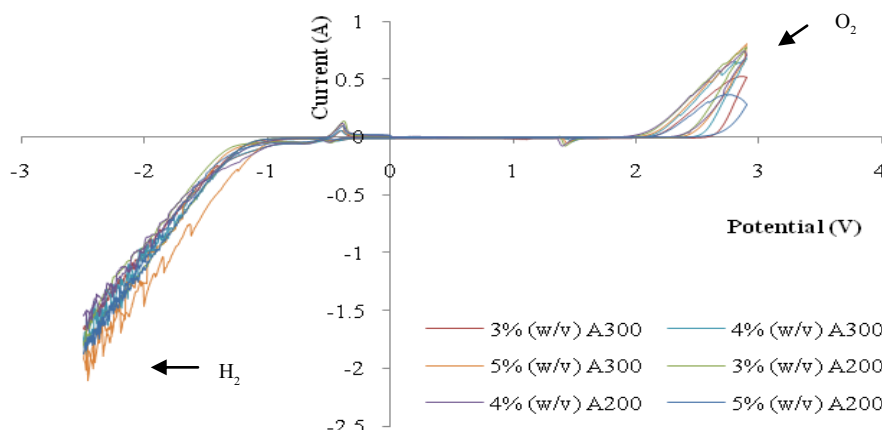
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่งที่ใช้ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกันและความเข้มข้นต่างกัน ผลการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมตรีแสดงดังรูป 35 พบว่า ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรลดการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนได้ดีกว่าฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร โดยฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีฟุ้งทางฝั่งบวกซึ่งแสดงการสูญเสียออกซิเจนน้อยที่สุด รวมทั้งฟุ้งทางฝั่งลบซึ่งแสดงถึงการสูญเสียไฮโดรเจนต่ำที่สุดเช่นกัน จึงเลือกใช้ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากใช้ปริมาณฟุ้งซิลิกาน้อยกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 35 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นฟุ้งซิลิกาต่างๆ

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy

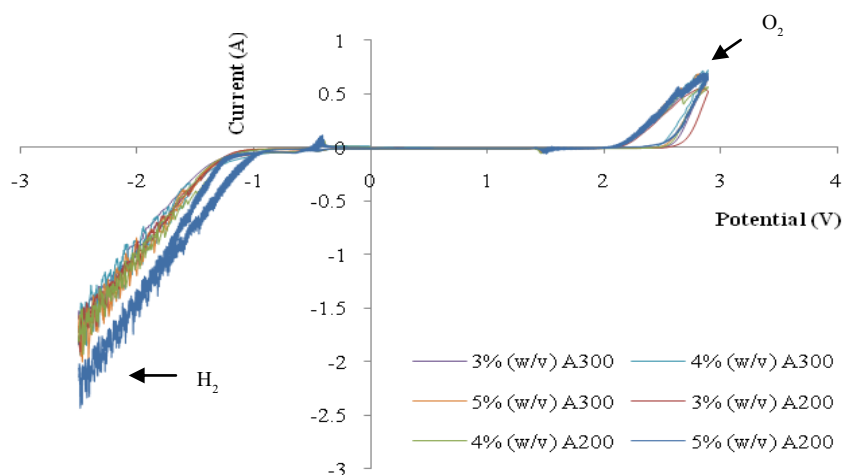
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกันและความเข้มข้นฟุ้งซิลิกาต่างกัน ผลการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมตรีแสดงดังรูป 36 พบว่า ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีฟุ้งทางฝั่งบวกซึ่งแสดงการสูญเสียออกซิเจนน้อยที่สุด แต่ฟุ้งทางฝั่งลบซึ่งแสดงถึงการสูญเสียไฮโดรเจนสูง ขณะเดียวกันความเข้มข้นฟุ้งซิลิการ้อยละ 2 นั้นมีลักษณะการตกตะกอนแยกชั้นของฟุ้งซิลิกาจึงไม่เหมาะสมสำหรับเจลแบตเตอรี่แบบมีวาล์วควบคุม ขณะที่ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เกิดการสูญเสียออกซิเจนน้อยรองลงมาแต่มีการสูญเสียไฮโดรเจนสูง ซึ่งเกิดความไม่สมดุลกันระหว่างการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนทำให้ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนของผิวหน้าขั้ว จึงเลือกใช้ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากมีความสมดุลของการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนดีกว่า และมีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนไม่มากนัก



รูปที่ 36 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างๆ

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS

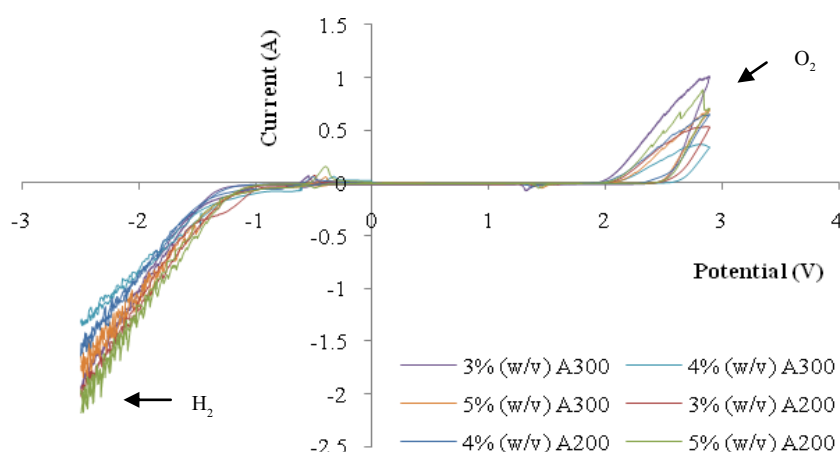
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้พุ่มซิลิกานาอนุภาคต่างกันและความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างกัน ผลการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมตรีแสดงดังรูป 37 พบว่า ผลของอนุภาคและปริมาณพุ่มซิลิกาในสารเติมแต่งชนิดนี้มีผลต่อการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนน้อยมาก โดยพุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและพุ่มซิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นร้อยละ 5 นั้นมีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนที่สูง ขณะที่พุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เกิดการสูญเสียออกซิเจนน้อยใกล้เคียงกับความเข้มข้นอื่นๆ จึงเลือกใช้พุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 37 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างๆ

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PSS

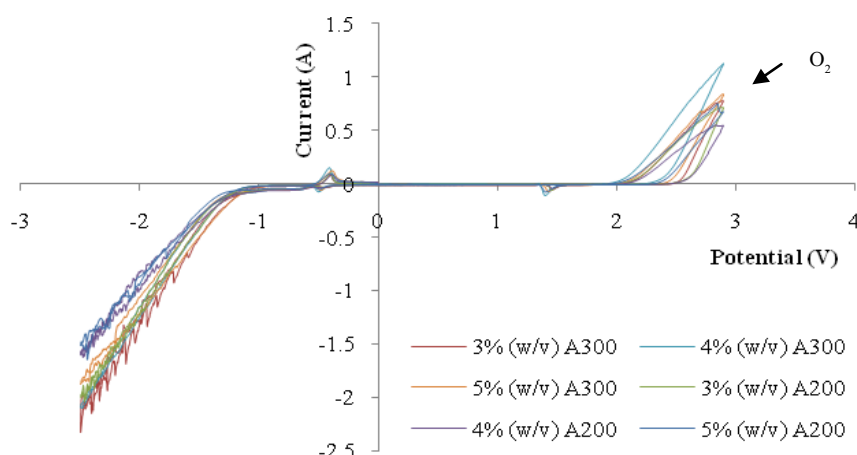
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PSS ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกันและความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างกัน ผลการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมทรีแสดงดังรูป 38 พบว่า พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนน้อยที่สุดและมีความสมดุลกันระหว่างการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจน



รูปที่ 38 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม ของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PSS ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างๆ

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL

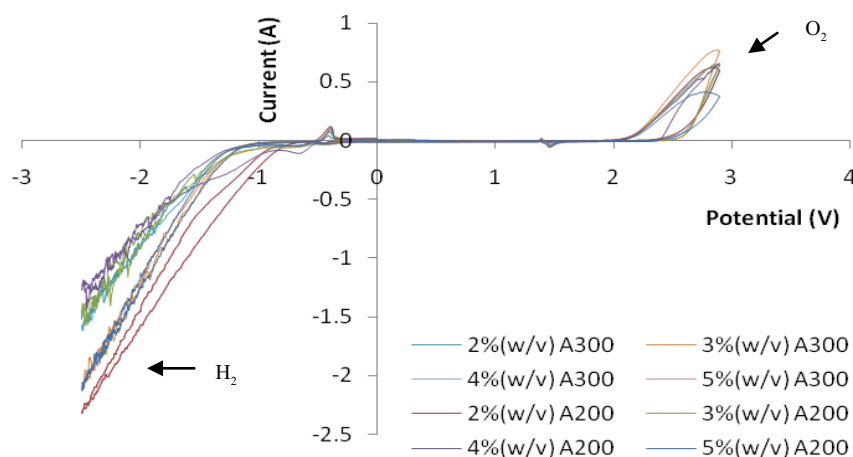
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกันและความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างกัน ผลการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมทรีแสดงดังรูป 39 พบว่า พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนน้อยที่สุดและมีความสมดุลกันระหว่างการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจน



รูปที่ 39 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างๆ

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPY ผสม IL

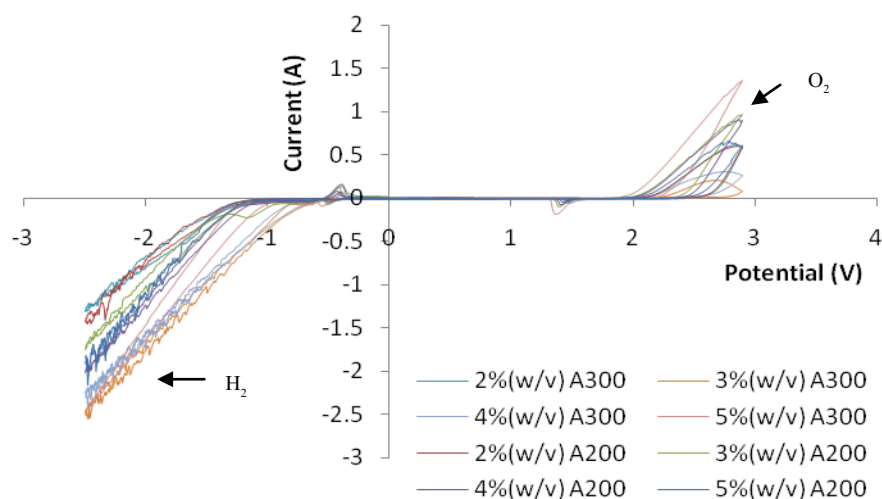
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPY ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมกับ IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกัน และความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างกัน ผลการทดสอบไชคลิกโวลแทมเมทรีแสดงดังรูป 40 พบว่า พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนน้อยที่สุดแต่ความสมดุลกันระหว่างการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนไม่มากนัก รวมทั้งพุ่มซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ยังไม่เกิดเป็นเจล มีลักษณะเพียงการตกตะกอนแยกชั้นของพุ่มซิลิกาเท่านั้น ซึ่งเมื่อบรรจุลงแบตเตอรี่จะทำให้เกิดการรั่วหรือซึมของอิเล็กโทรไลต์อยู่ จึงทำการพิจารณาการสูญเสียไฮโดรเจน -ออกซิเจนที่น้อยที่สุดลำดับถัดมา ซึ่งก็คือ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พุ่มซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยนอกจากมีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนที่น้อยแล้วยังมีสมดุลของอัตราการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ดีอีกด้วย



รูปที่ 40 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PPy ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรผสม IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ความเข้มข้นฟลูมซิลิกาต่างๆ

เจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PSS ผสม IL

เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PSS ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมกับ IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ฟลูมซิลิกานาโนอนุภาคต่างกัน และความเข้มข้นฟลูมซิลิกาต่างกัน ผลการทดสอบไชคลิกโวลแทมเมทรีแสดงดังรูป 33 พบว่า ฟลูมซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร และ 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนน้อยที่สุด และมีความสมดุลกันระหว่างการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจน ที่ดี แต่เนื่องจากฟลูมซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ยังไม่เกิดเป็นเจลดังที่ได้กล่าวข้างต้น จึงทำการพิจารณาการสูญเสียไฮโดรเจน- ออกซิเจนที่น้อยที่สุด ลำดับถัดมา ซึ่งก็คือ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ฟลูมซิลิกานาโน 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยนอกจากมีการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนที่น้อยและมีสมดุลของอัตราการผลิตไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ดีอีกด้วย

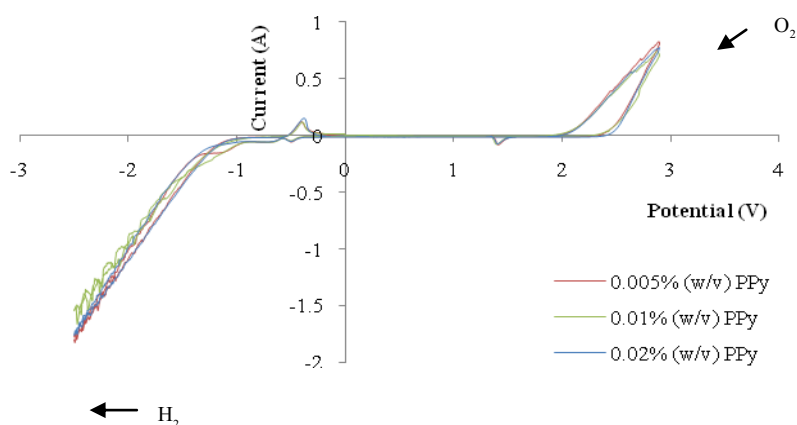


รูปที่ 41 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง Pss ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรผสม IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกาต่างๆ

- ผลของความเข้มข้นสารเติมแต่ง

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy

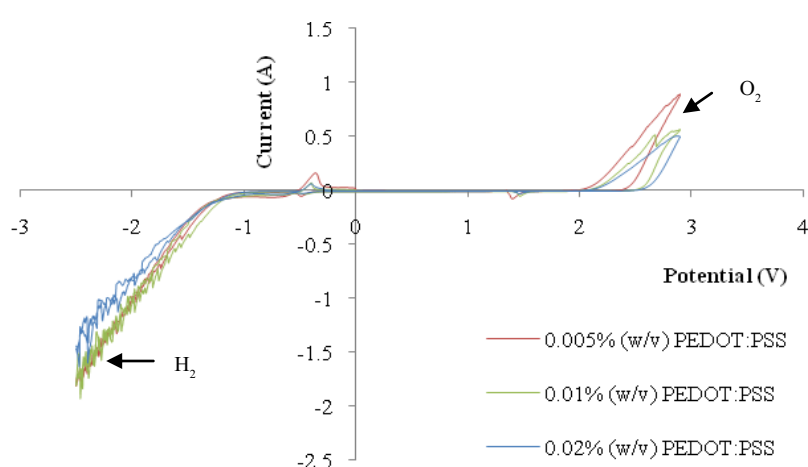
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พุ่มซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เติมสารเติมแต่ง PPy ที่ความเข้มข้นต่างกัน ผลการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์แสดงดังรูปที่ 42 พบว่า ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PPy ไม่มีผลต่อการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจน



รูปที่ 42 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A200

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS

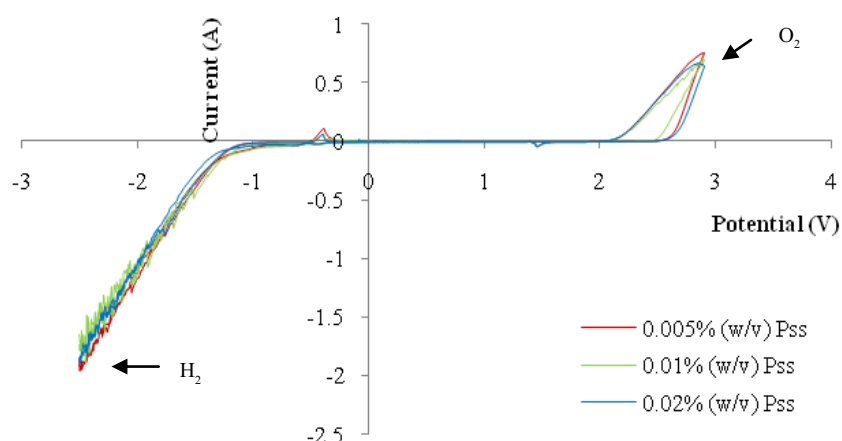
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ฟุ้งซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นฟุ้งซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ที่ความเข้มข้นต่างกัน ผลการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์แสดงดังรูปที่ 43 พบว่า ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PEDOT:PSS มีผลต่อการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจน โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนได้ดีที่สุด ขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไม่ช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจน



รูปที่ 43 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของฟุ้งซิลิกา A200

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง Pss

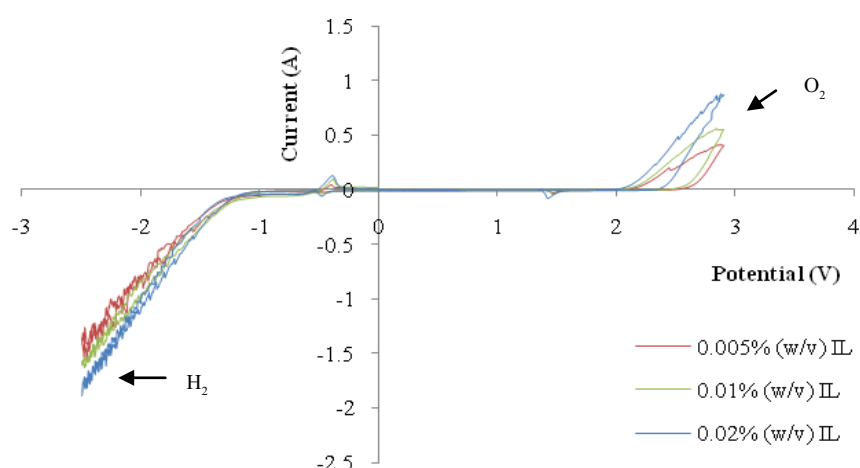
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ฟุ้งซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นฟุ้งซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยเติมสารเติมแต่ง ที่ความเข้มข้นต่างกัน ผลการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์แสดงดังรูปที่ 44 พบว่า ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง Pss มีผลต่อการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนเล็กน้อย โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง Pss ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนและมีความสมดุลของการสูญเสียไฮโดรเจน -ออกซิเจนดีที่สุด ขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไม่ช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจน



รูปที่ 44 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลเล็กโพลีไธม์สารเติมแต่ง PSS ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของฟุ้งซิลิกา A300

เจลอิลเล็กโพลีไธม์สารเติมแต่ง IL

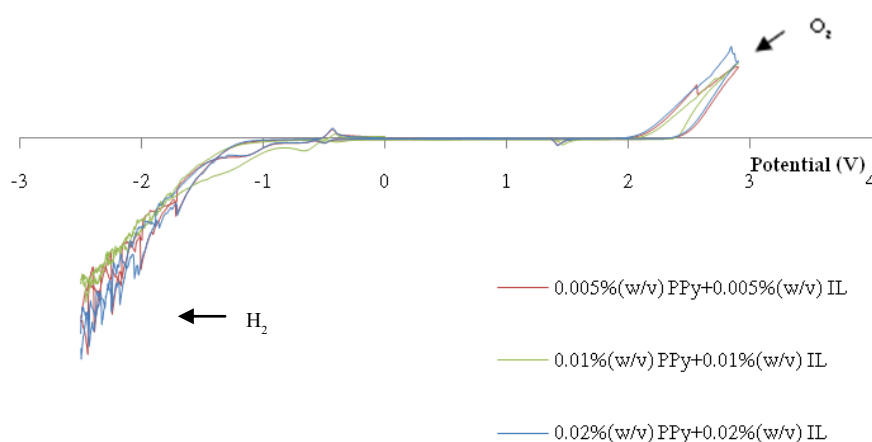
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิลเล็กโพลีไธม์ที่ใช้ฟุ้งซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นฟุ้งซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร เติมสารเติมแต่ง ที่ความเข้มข้นต่างกัน ผลการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนของเจลอิลเล็กโพลีไธม์แสดงดังรูปที่ 45 พบว่า ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง IL มีผลต่อการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจน โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนและมีความสมดุลของการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนดีที่สุด ขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไม่ช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจน



รูปที่ 45 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิลเล็กโพลีไธม์สารเติมแต่ง IL ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของฟุ้งซิลิกา A200

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ผสม IL

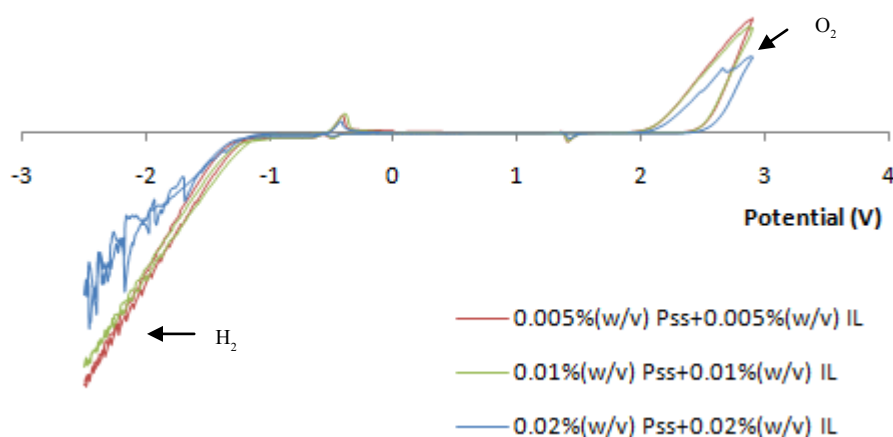
เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ฟลูออรีนขนาด 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นฟลูออรีนร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เติมน้ำหนักต่างกัน ผลการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์แสดงดังรูปที่ 46 พบว่า ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PPy ผสม IL มีผลต่อการสูญเสียไฮโดรเจน -ออกซิเจนเล็กน้อย โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PPy ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน -ออกซิเจนและมีความสมดุลของการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนดีที่สุด



รูปที่ 46 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ผสม IL ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของฟลูออรีน A200

เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง Pss ผสม IL

เปรียบเทียบการสูญเสียไฮโดรเจนและออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ฟลูออรีนขนาด 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นฟลูออรีนร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เติมน้ำหนักต่างกัน ผลการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนของเจลอิเล็กโทรไลต์แสดงดังรูปที่ 47 พบว่า ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง Pss ผสม IL มีผลต่อการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจน โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง Pss ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ช่วยลดการสูญเสียไฮโดรเจน -ออกซิเจนและมีความสมดุลของการสูญเสียไฮโดรเจน-ออกซิเจนดีที่สุด

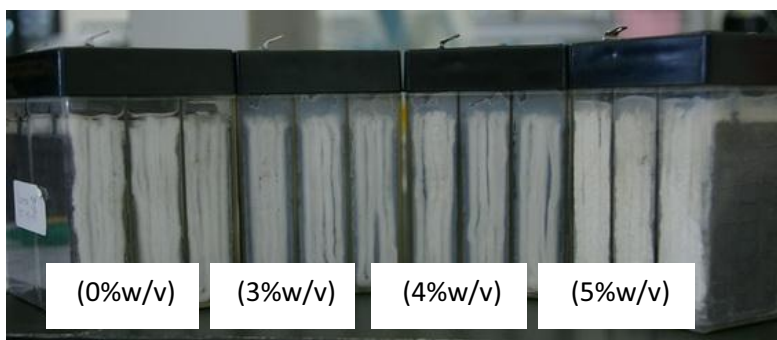


รูปที่ 47 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ผสม IL ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกา A200

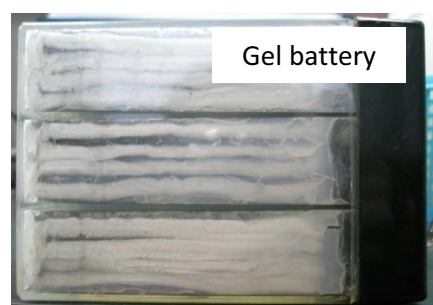
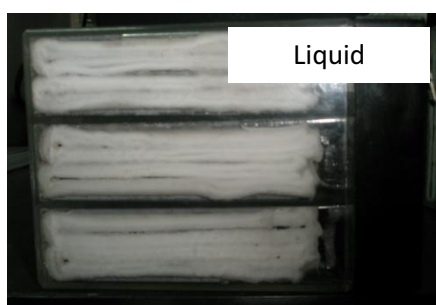
3. ผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่

ในส่วนการทดสอบแบตเตอรี่ ปกติใช้แบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบมีขนาดความจุประจุ 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ 6 ช่อง อิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสถานะของเหลวและเจลจะเติมลงในแบตเตอรี่ด้วยเครื่องเติมน้ำกรดสูญญากาศ ในขั้นตอนการเติมอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่พบว่าอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสถานะของเหลวจะเติมได้ง่ายกว่าและ ใช้เวลาในการเติมน้อยกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกาปริมาณมากจะใช้ระยะเวลาในการเติมมากขึ้น และเมื่อสังเกตคุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่หลังการเติมอิเล็กโทรไลต์เรียบร้อยแล้ว พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เจลจะมีช่องว่างภายในแบตเตอรี่มากกว่าในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว และเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไปจะให้เนื้อเจลที่แข็งไม่มีส่วนของน้ำกรดเหลืออยู่ด้านบนดังแสดงในรูปที่ 48 ก) และเมื่อวางแบตเตอรี่แนวนอนดังแสดงในรูปที่ 48 ข) พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นไม่มีการไหลของอิเล็กโทรไลต์ จึงกล่าวได้ว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นช่วยลดการรั่วซึมของน้ำกรด

ก)



ข)

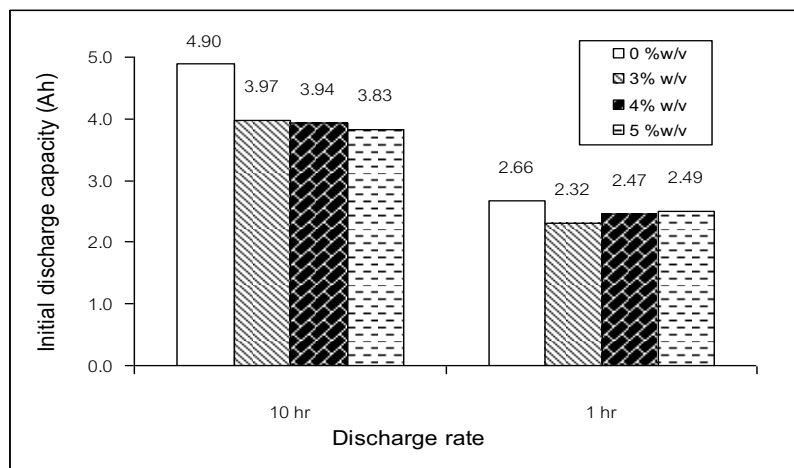


รูปที่ 48 คุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เหลวกับเจลที่เตรียมจากปริมาณฟลูออรีนต่าง ๆ ก) วางแนวตั้ง ข) วางแนวนอน

3.1 ผลของปริมาณฟลูออรีนที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเจลจะทำให้ค่าการคายประจุเริ่มต้นที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเหลว ดังแสดงในรูปที่ 49 และ 50 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกระบวนการเติมอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะเจลจะมีความหนืดมากกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในสถานะของเหลวมาก ดังนั้นจึงส่งผลให้การกระจายตัวของเจลอิเล็กโทรไลต์ภายในแบตเตอรี่ไม่ดีเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว สังเกตได้จากคุณลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่ เมื่อเติมเจลอิเล็กโทรไลต์ลงในแบตเตอรี่จะพบว่ามีช่องว่าง มากกว่าในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวที่กล้วแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงส่งผลต่อการถ่ายโอนประจุในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการคายประจุซึ่งทำได้ยากกว่า ค่าการคายประจุเริ่มต้นของเจลแบตเตอรี่จึงน้อยกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราเร็วการคายประจุ (1 ชั่วโมง) จะพบว่าความแตกต่างของค่าความจุในการคายประจุเริ่มต้นจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 49 และ 50 ข) เนื่องจากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติไอโซโทรปีจะอ่อนตัวเมื่อมีแรงมากระทำ การอัดและคายประจุของแบตเตอรี่เป็นการให้แรงกับเจล ดังนั้นที่อัตราการคายประจุที่สูงจะส่งผลให้เจลเกิดการอ่อนตัวมากกว่าการคายประจุที่ต่ำ จึงช่วยลดช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ ส่งผลให้ค่าความจุเริ่มต้นมีค่า

ใกล้เคียงกัน สำหรับปริมาณฟุ้งซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ส่งผลแบบไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่

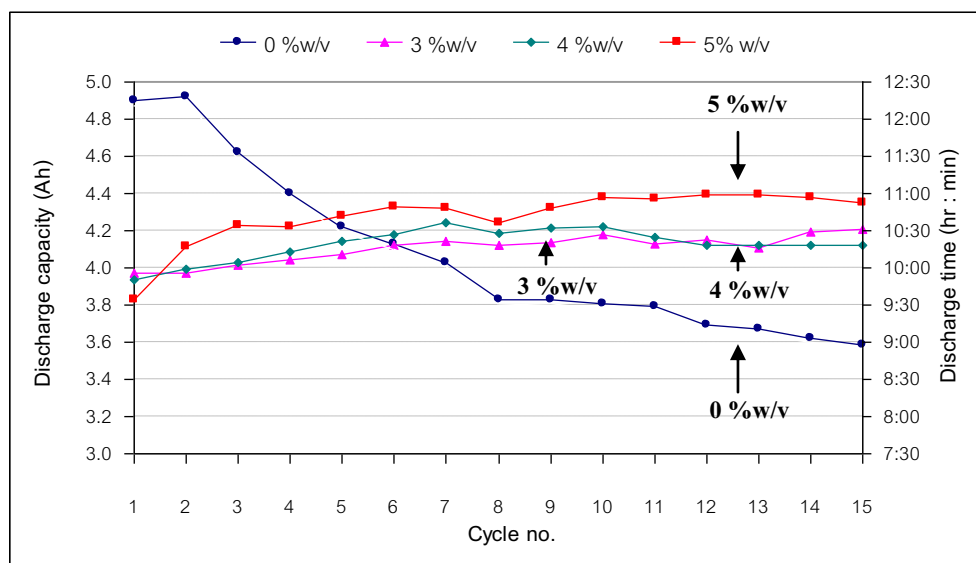


รูปที่ 49 ค่าความจุการคายประจุเริ่มต้นที่อัตราเร็วในการคายประจุ 10 และ 1 ชั่วโมงเปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะเหลวและเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณฟุ้งซิลิกาต่าง ๆ

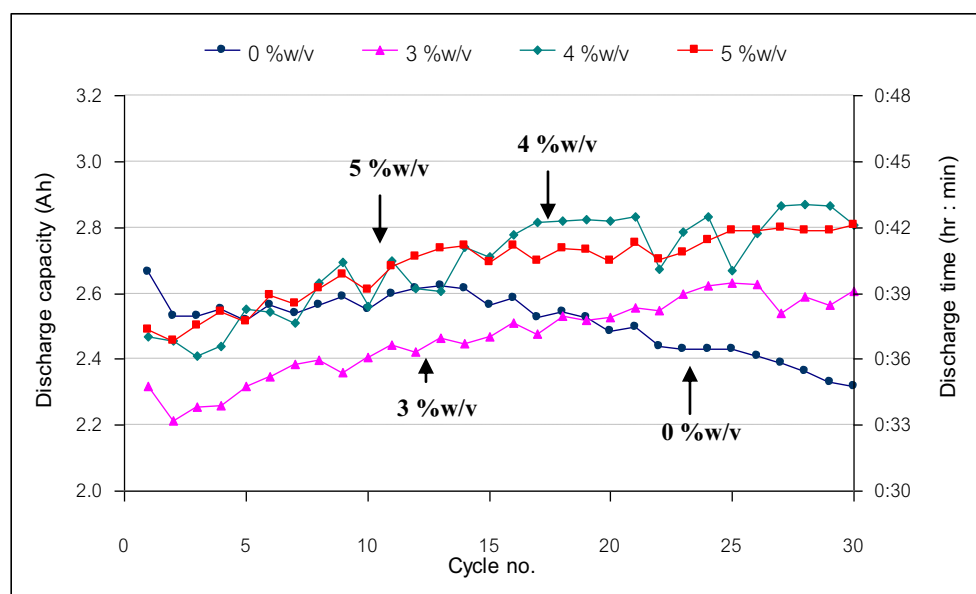
นอกจากนี้ผลการทดสอบสมรรถนะความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ (10 ชั่วโมง) และสูง (1 ชั่วโมง) ดังแสดงในรูปที่ 50 ก) และ ข) ตามลำดับ พบว่าถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวจะให้ค่าความจุในการคายประจุช่วงเริ่มต้นที่มากกว่าแบตเตอรี่ ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเจล แต่เมื่อจำนวนรอบการทดสอบแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น สมรรถนะของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวกลับให้ค่าความจุลดลงในขณะที่แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเจลมีแนวโน้มให้ค่าความจุในการคายประจุที่เพิ่มขึ้น เหตุผลหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวมีสมรรถนะที่ลดลงในขณะที่แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเจลยังคงให้ค่าเพิ่มขึ้นนั้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์เหลวจะเกิดการกัดกร่อนได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะเจล และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเจลให้ค่าความจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเกิดการรวมกันเป็นเนื้อเดียวของเจลอิเล็กโทรไลต์มากขึ้นและช่วยลดช่องว่างภายในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นระหว่างการเติมอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีการอัด /คายประจุอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ระยะเวลาในการเสื่อมสมรรถนะของเจลแบตเตอรี่ช้ากว่า ซึ่งจำนวนรอบที่ใช้ในการทดลองนี้ยังไม่เห็นการเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่ จากผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัด /การคายประจุต่ำ (50 ก)) เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากฟุ้งซิลิกา 5 %w/v จะให้แนวโน้มค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่สูงที่สุดในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากฟุ้งซิลิกา 4 %w/v และ 3 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน และจากผลการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัดการคายประจุสูง (42 ข)) เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากฟุ้งซิลิกา 5 และ 4 %w/v จะให้แนวโน้มค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มมากกว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมขึ้นจากฟุ้งซิลิกา 3 %w/v สำหรับแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 6 %w/v พบว่าให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ต่ำมาก เนื่องจากในเจ

ลองประกอบนี้ให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่สั้น (น้อยกว่า 3 ชั่วโมง) ส่งผลให้มีความหนืดมากทำให้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมลงในแบตเตอรี่ได้มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณความจุจริงของแบตเตอรี่และเนื้อเจลกระจายตัวได้ไม่ดีเกิดช่องว่างภายในแบตเตอรี่เป็นจำนวนมากนั่นเอง และแบตเตอรี่ที่เตรียมจากพูนซิลิกา 2 %w/v พบว่ายังคงมีการแยกชั้นน้ำกับเจลและมีรั่วของน้ำการระหว่างการอัดประจุ จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำมาพิจารณา

ก)



ข)



รูปที่ 50 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกาปริมาณต่างๆ โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) อัตราเร็วในการคายประจุ 10 ชั่วโมง ข) อัตราเร็วในการคายประจุ 1 ชั่วโมง

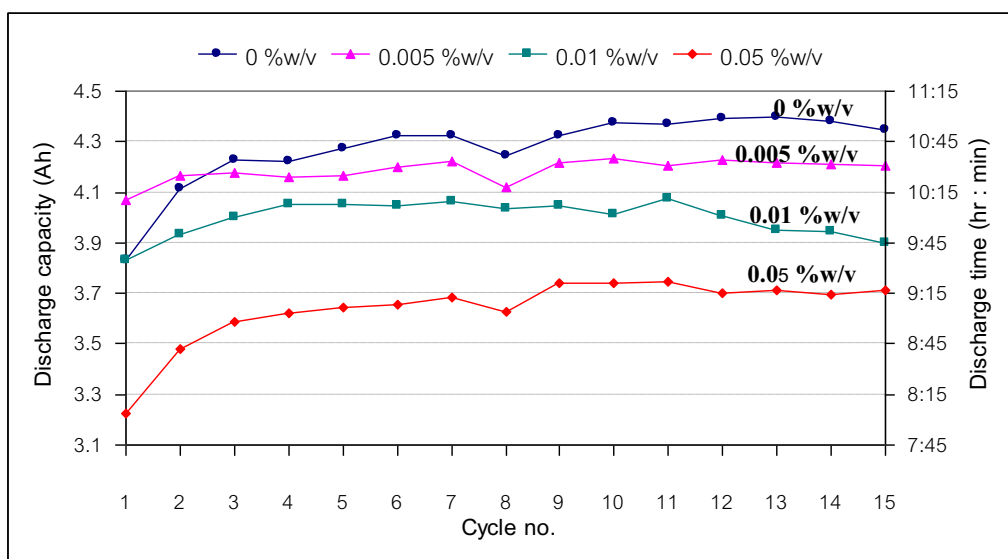
3.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่

3.2.1 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่โดยใช้เครื่องทดสอบ

สำหรับในส่วนนี้สารเติมแต่งที่นำมาทดสอบ คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิฟิโรล สารประกอบแอลดีไฮด์ และวานิลลิน สำหรับสารเติมแต่งพอลิเอคริลาไมด์พบว่าเกิดการตกตะกอนดังแสดงในส่วนของการทดสอบเจลอิเล็กโทรไลต์ข้างต้น ถึงแม้ว่านำสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งพอลิเอคริลาไมด์ที่ทดสอบระยะเวลาในการเกิดเจลแล้วไม่เกิดการตกตะกอนแล้วก็ตาม แต่เมื่อมีการขยายขนาดการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับการเติมลงในแบตเตอรี่ พบว่าเกิดการตกตะกอนขึ้นซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากความแรงในการกวนไม่เพียงพอที่จะทำให้ฟุ้งซิลิกาเกิดการแตกตัวมากพอที่จะจับหรือสร้างพันธะพร้อมกับกรดซัลฟิวริกและพอลิเอคริลาไมด์จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนคล้ายกับการเติมอัตราส่วนพอลิเอคริลาไมด์ที่มากเกินไปแล้วข้างต้น ตะกอนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการอุดตันภายในเครื่องเติมน้ำกรด ดังนั้นสารเติมแต่งพอลิเอคริลาไมด์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งภายในเจลแบตเตอรี่ โดยการทดสอบจะใช้การทดสอบสมรรถนะในการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เป็นการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ของเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีการเติมสารเติมแต่งและให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง จึงคัดเลือกสภาวะที่ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ดีมาทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง) ต่อไป

- ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต

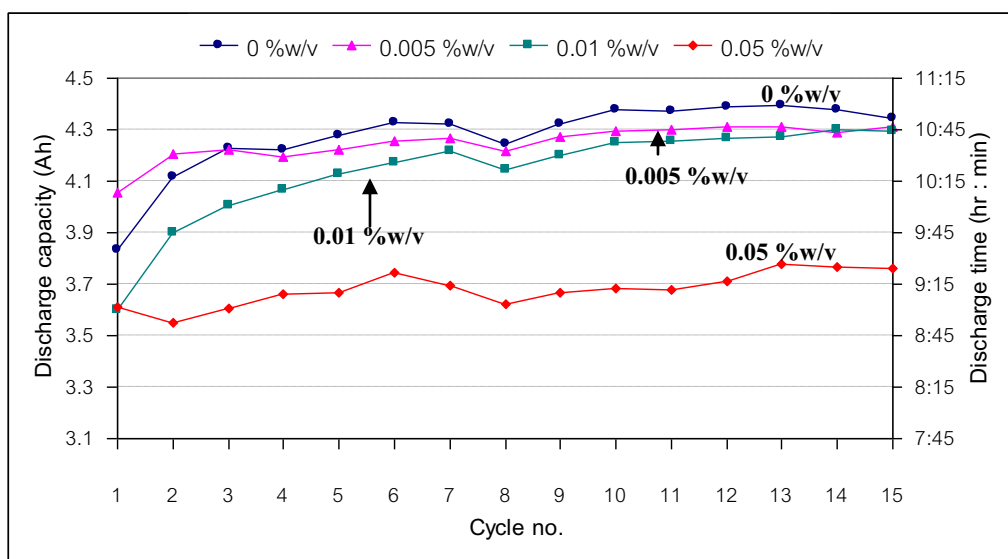
รูปที่ 51 แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005, 0.01 และ 0.05 %w/v เลือกใช้ปริมาณฟุ้งซิลิกาที่ 5 %w/v ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ ดีที่สุดและไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลดังกล่าวข้างต้น จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ พบว่าสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่งผลให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งในทุกๆ ความเข้มข้นที่ศึกษา โดยจะมีค่าความจุในการคายประจุต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 51 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอลิเมทาครีเลตต่างๆ โดยมีปริมาณพุ่มซิลิกา 5 %w/v

- ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งพอลิพีร์โรล

รูปที่ 52 แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งพอลิพีร์โรลที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005, 0.01 และ 0.05 %w/v เลือกใช้ปริมาณพุ่มซิลิกาที่ 5 %w/v ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีที่สุดและไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลดังกล่าวข้างต้นเช่นเดียวกับสารเติมแต่งพอลิเมทาครีเลต จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ พบว่าสารเติมแต่งพอลิพีร์โรลส่งผลให้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ ที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งในทุกๆ ความเข้มข้นที่ศึกษาและมีค่าความจุในการคายประจุต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งพอลิพีร์โรล



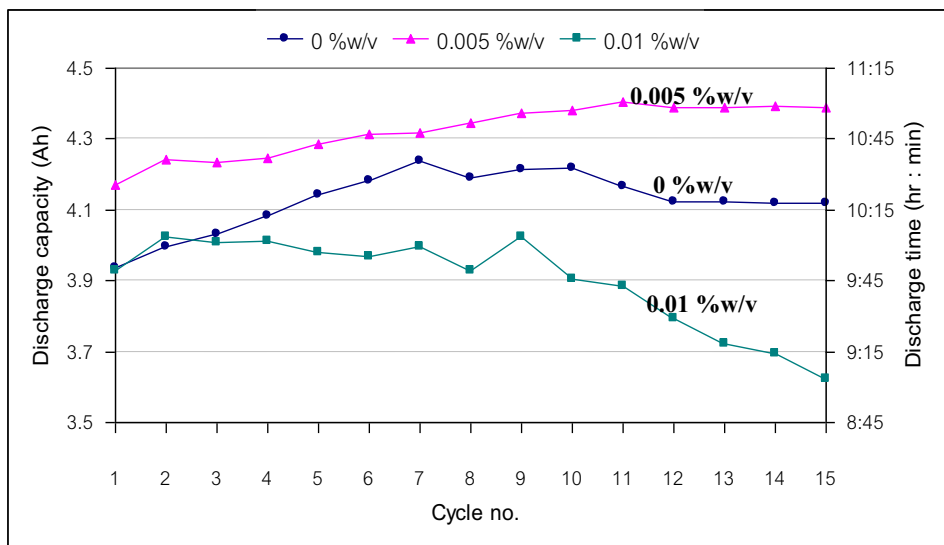
รูปที่ 52 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุ ของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณพอลิพีไรด์ต่างๆ โดยมีปริมาณฟลูออรีน 5 %w/v

- ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลกอฮอล์

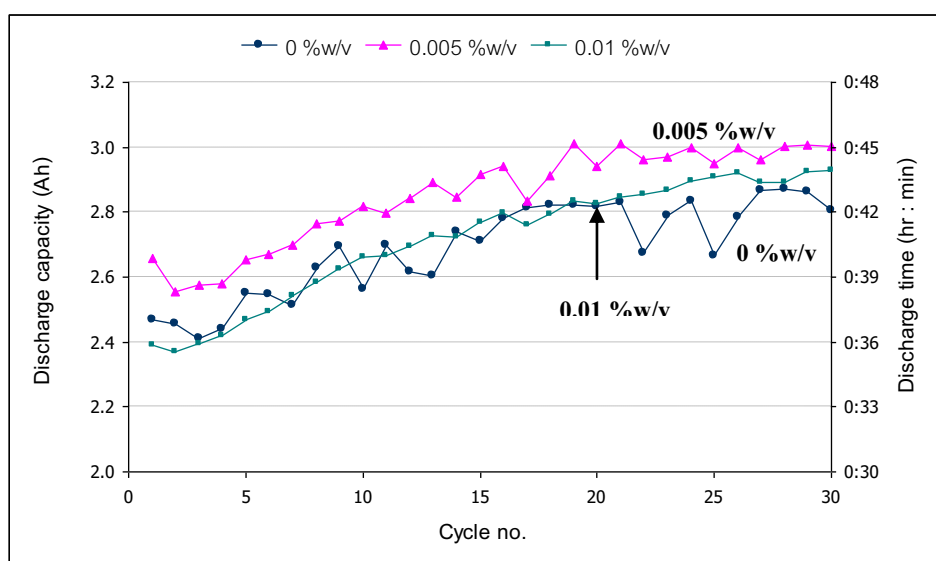
รูปที่ 53 ก) แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลกอฮอล์ที่มี ต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005 และ 0.01 %w/v ที่ฟลูออรีน 4 %w/v เนื่องจากสารประกอบแอลกอฮอล์ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดเจลดังกล่าวข้างต้น จึงไม่สามารถเติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟลูออรีน 5 %w/v ที่ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีที่สุด ได้ จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำพบว่า สารประกอบแอลกอฮอล์ส่งผลต่อค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ดีที่สุด ในขณะที่ปริมาณสารประกอบแอลกอฮอล์ที่ 0.01 %w/v ให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งและเมื่อพิจารณาในช่วงท้ายของการทดลองพบว่าค่าความจุในการคายประจุแบตเตอรี่ลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นถึงปริมาณสารเติมแต่งสารประกอบแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปจะส่งผลให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบแอลกอฮอล์นอกจากจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนแล้วความเข้มข้นที่มากเกินไปอาจเป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยาหลักของแบตเตอรี่ (ปฏิกิริยาการอัด/คายประจุ) ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลง

นอกจากนี้เมื่อนำมาทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุสูงดังแสดงรูปที่ 45 ข) พบว่าแบตเตอรี่ที่มีสารประกอบแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 0.005 %w/v ยังคงให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ดีที่สุดเช่นเดียวกับการทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ ส่วนแบตเตอรี่ที่มีสารประกอบแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 0.01 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง

ก)



ข)



รูปที่ 53 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของ เจลแบตเตอรี่ ที่ปริมาณสารประกอบแอลดีไฮด์ต่างๆ โดยมีปริมาณฟุ้งซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

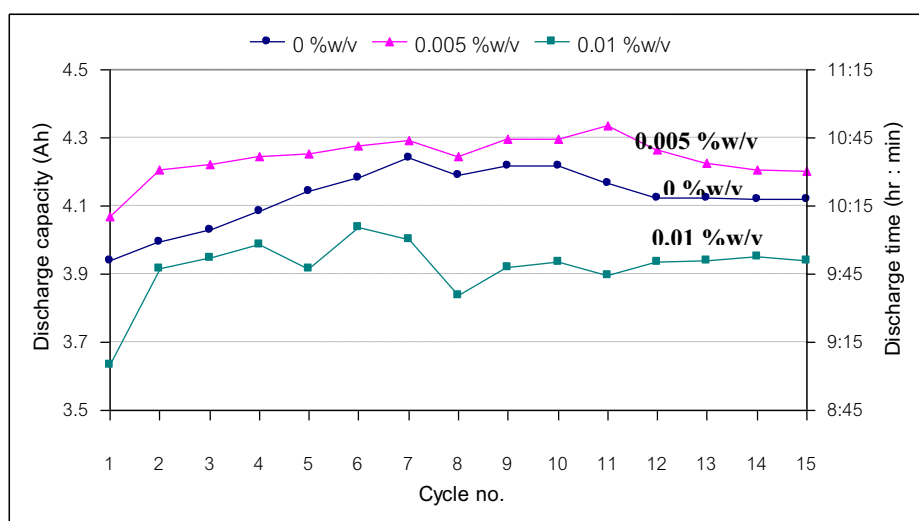
- ผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่งวานิลลิน

รูปที่ 54 แสดงผลการทดสอบของการเติมสารเติมแต่งวานิลลินที่มีต่อสมรรถนะของ แบตเตอรี่ ศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005 และ 0.01 %w/v ที่ฟุ้งซิลิกา 4 %w/v จากผลการทดสอบค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำให้ผลคล้ายกับผลของสารเติมแต่งสารประกอบแอลดีไฮด์ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะโครงสร้างทางเคมีของ

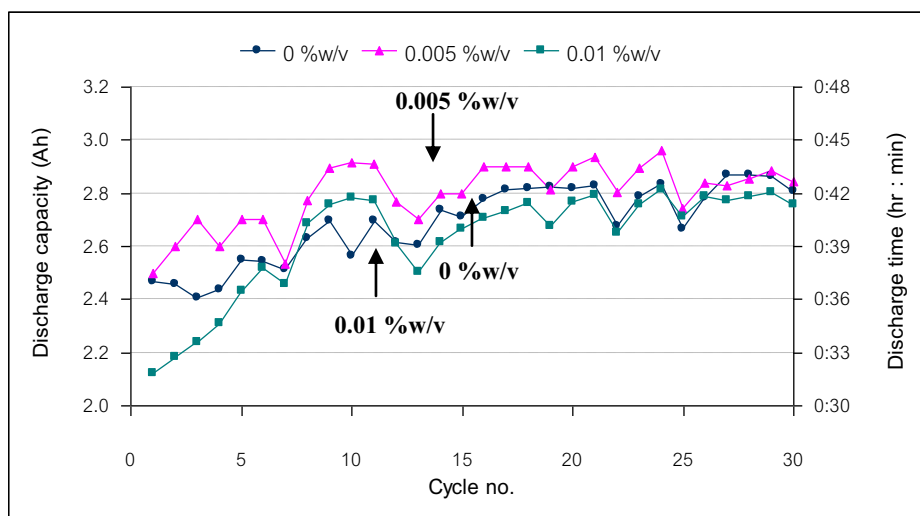
สารประกอบแอลดีไฮด์และวานิลลิน นั้นคล้ายกันโดยพบว่าสารเติมแต่งวานิลลินส่งผลต่อค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยที่ความเข้มข้น 0.005 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ดีที่สุด ในขณะที่ปริมาณวานิลลินที่ 0.01 %w/v ให้ค่าแนวโน้มความจุการคายประจุที่ต่ำกว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แสดงให้เห็นถึงปริมาณสารเติมแต่งวานิลลินที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของ วานิลลินนอกจากจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนแล้วความเข้มข้นที่มากเกินไปอาจเป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยาหลักของแบตเตอรี่ (ปฏิกิริยาการอัด/คายประจุ) ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลงเช่นเดียวกับสารประกอบแอลดีไฮด์

นอกจากนี้เมื่อนำมาทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุสูงดังแสดงรูปที่ 46 ข) พบว่าแบตเตอรี่ที่มีสารเติมแต่งวานิลลิน ความเข้มข้น 0.005 %w/v ยังคงให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่โดยรวมดีที่สุดเช่นเดียวกับการทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ ส่วนแบตเตอรี่ที่มีสารประกอบวานิลลินความเข้มข้น 0.01 %w/v จะให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ต่ำกว่ากับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งเล็กน้อย

ก)

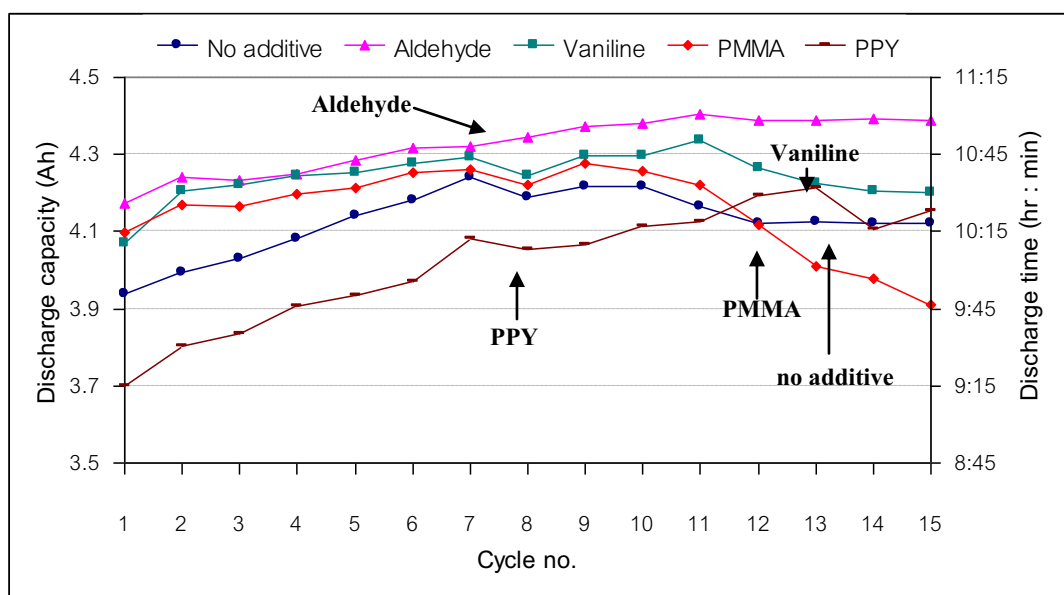


ข)



รูปที่ 54 ค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่รอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ที่ปริมาณสวานิลินต่างๆ โดยมีปริมาณพุ่ม ซิลิกา 4 %w/v ก) อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

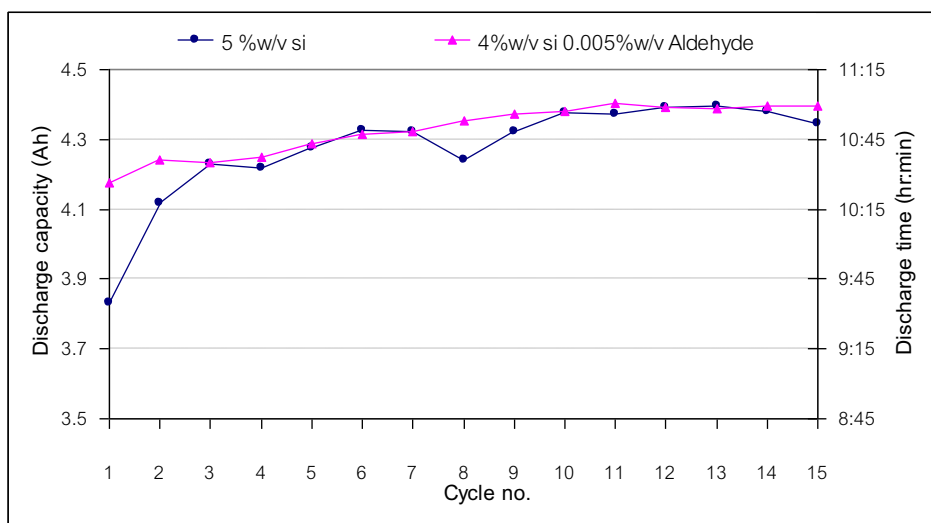
นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบชนิดของสารเติมแต่งที่เติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณสมบัติของแบตเตอรี่ โดยศึกษาปริมาณสารเติมแต่ง 0.005 %w/v ปริมาณพุ่มซิลิกาที่ 4 %w/v ในการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากในองค์ประกอบนี้สารเติมแต่งทุกชนิดสามารถเติมลงในเจลอิเล็กโทรไลต์ได้ เมื่อพิจารณาจากระยะเวลาในการเกิดเจลที่มากกว่า 3 ชั่วโมง จากผลการทดสอบหาค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วต่ำ (10 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 55 พบว่าสารเติมแต่ง สารประกอบแอลกอฮอล์ และวานิลิน ให้ค่าแนวโน้มความจุในการคายประจุสูงกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง ในขณะที่สารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตให้ค่าการคายประจุในช่วงเริ่มต้นที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แต่จะลดลงอย่างรวดเร็วเห็นได้หลังจากการทดลองในรอบที่ 10 เป็นต้นไป ในทางตรงกันข้ามสารเติมแต่งพอลิพีร์โรลให้ความจุการคายประจุเริ่มต้นที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แต่จะค่อยๆเพิ่มค่าความจุของแบตเตอรี่มากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง แต่อย่างไรก็ตามสารเติมแต่งสารประกอบแอลกอฮอล์ยังคงให้ค่าความจุในการคายประจุสูงสุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในตารางที่ 10 พบว่าสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ค่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 – 97 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพมากกว่าเจลแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง (ประสิทธิภาพร้อยละ 92) แสดงว่าสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแบตเตอรี่



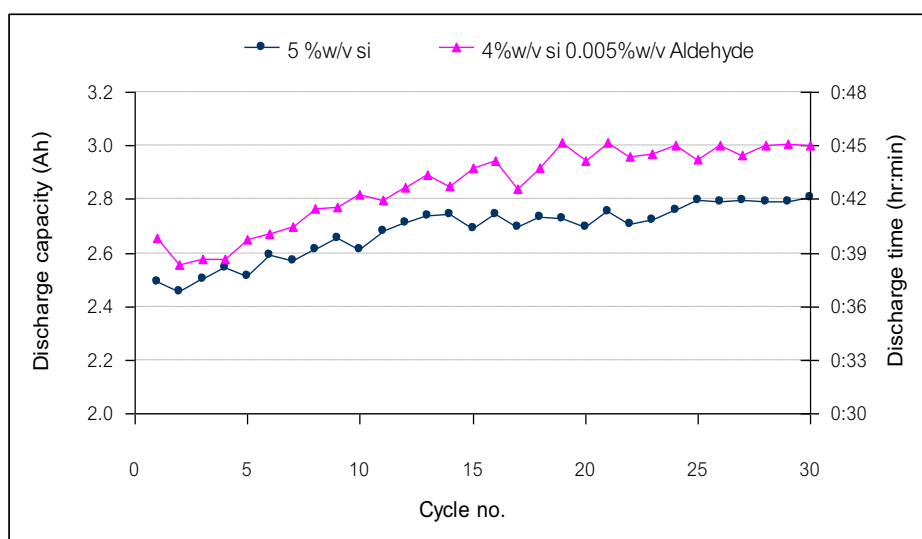
รูปที่ 55 แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งานของเจลแบตเตอรี่ที่อัตราคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) เมื่อเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 0.005 %w/v โดยมีปริมาณพูนซิลิกา 4 %w/v

จากผลการทดสอบต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นพบว่าสารเติมแต่งสารประกอบแอลดีไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณพูนซิลิกา 4 %w/v ให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดและเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่มีเจลอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากพูนซิลิกา 5%w/v จากผลการทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำดังแสดงในรูปที่ 56 ก) พบว่าสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองจะให้แนวโน้มค่าความจุในการคายประจุที่ใกล้เคียงกัน แต่จากผลการทดสอบที่อัตราการคายประจุสูงดังแสดงในรูปที่ 56 ข) พบว่าสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบแอลดีไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณพูนซิลิกา 4 %w/v จะให้ค่าความจุในการคายประจุที่มากกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากพูนซิลิกา 5 %w/v ประมาณร้อยละ 6.34 (จากค่าความจุในการคายประจุเฉลี่ย) และให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สูงกว่าร้อยละ 7.23 และ 2.93 การทดสอบที่อัตราเร็วต่ำและสูงตามลำดับ อีกทั้งสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบแอลดีไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณพูนซิลิกา 4 %w/v ยังง่ายต่อกระบวนการเติมเจลลงในแบตเตอรี่มากกว่าเจลอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากพูนซิลิกา 5 %w/v ดังนั้นสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบแอลดีไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณพูนซิลิกา 4 %w/v จึงเป็นสูตรเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แบบวาล์วควบคุมที่ดีที่สุดในการศึกษา

ก)



ข)



รูปที่ 56 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุ ของเจลแบตเตอรี่เมื่อเติมสารเติมแต่งสารประกอบแอลดีไฮด์ 0.005 %w/v ปริมาณฟุ้งซิลิกา 4 %w/v กับเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 5% w/v แสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ก) การทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (10 ชั่วโมง) ข) การทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 ชั่วโมง)

ตารางที่ 14 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 ₂ SO ₄	4.51	2.52	3.34	2.3	3.81	2.43	91.90	93.12
	H ₂ SO ₄ + Na ₂ SO 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

“PMMA” refers to Polymethyl methacrylate

“PPY” refers to Polypyrrole

“AL” refers to Aldehyde

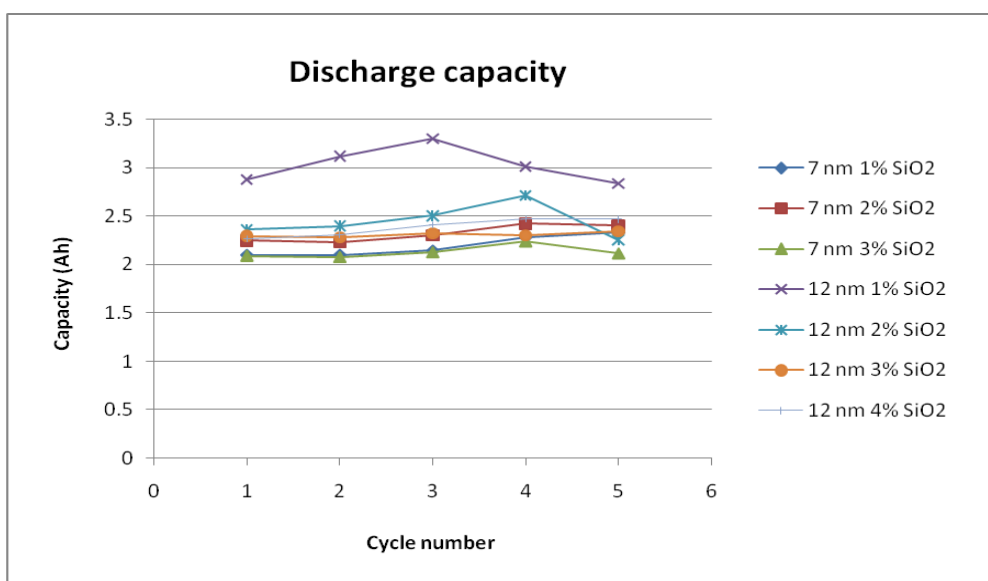
“Va” refers to Vanillin

3.2.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่ใช้การทดสอบแบบเตอรี่

แบบ manual

- ผลของปริมาณฟุ้งซิลิกา

ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่บรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้น 0.01% โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร และใช้ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกันระหว่าง 7 และ 12 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 43% โดยปริมาตร ทำการวัด 5 รอบ แสดงดังรูปที่ 57



รูปที่ 57 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่บรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้น 0.01% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ฟุ้งซิลิกาความเข้มข้นต่างกัน และฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกันระหว่าง 7 และ 12 นาโนเมตร ณ อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

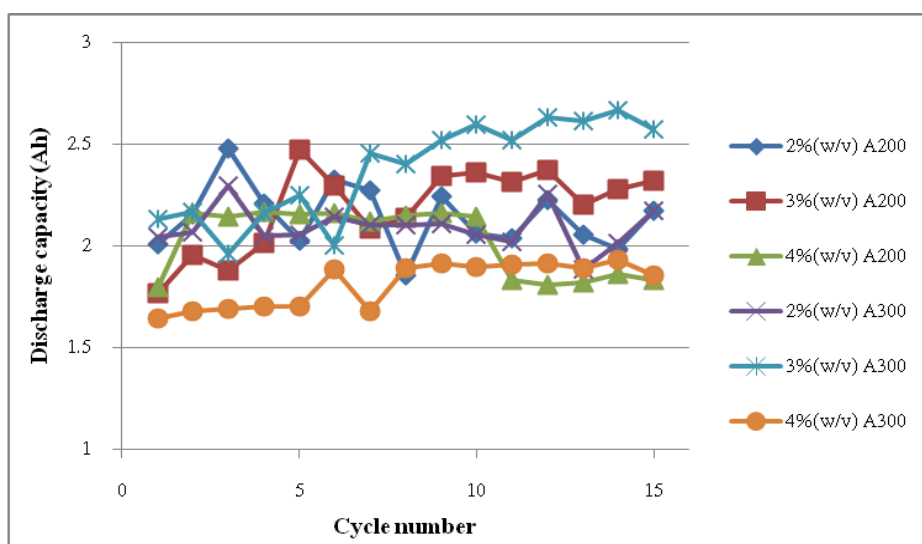
จากรูปที่ 57 แสดงให้เห็นว่าปริมาณฟุ้งซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้า ในการคายประจุของแบตเตอรี่ลดลง เนื่องจากอนุภาคฟุ้งซิลิกาทำให้เกิดแรงต้านทานภายในแบตเตอรี่สูงขึ้น ดังนั้น จึงต้องหาอัตราส่วนของกรดซัลฟิวริก น้ำปราศจากไอออน สารเติมแต่ง ปริมาณฟุ้งซิลิกา และขนาดอนุภาคของฟุ้งซิลิกาที่เหมาะสมต่อการเกิดเจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วให้มีประสิทธิภาพต่อไป

- ผลของสารเติมแต่งชนิดต่างๆ

ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่บรรจุเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง และเติมสารเติมแต่ง PPy PEDOT:PSS และ Pss ความเข้มข้น 0.01% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้ฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาคต่างกันระหว่าง 7 และ 12 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 43% โดยปริมาตร ทำการวัด 15 รอบ

ไม่เติมสารเติมแต่ง

เปรียบเทียบผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 4 แอมป์ จำนวน 15 รอบ ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่ง ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และ 7 นาโนเมตร (A300) ผลเป็นดังแสดงในรูป 58 พบว่า เจลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่ง พุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุสูงที่สุดโดยมีค่า ความจุไฟฟ้าในการคายประจุเฉลี่ย 2.37 แอมป์ชั่วโมง ขณะที่พุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุต่ำที่สุด

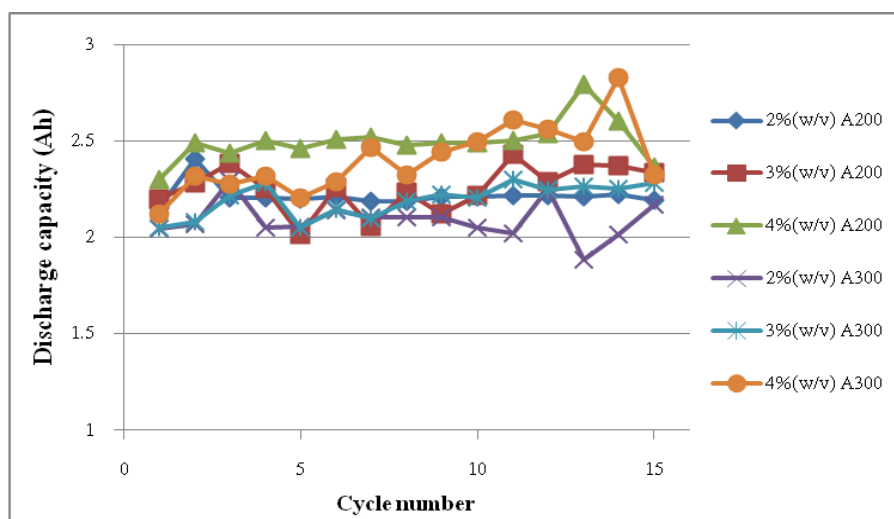


รูปที่ 58 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ไม่เติมสารเติมแต่ง ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 2-4 โดย น้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300)

เติมสารเติมแต่ง PPy

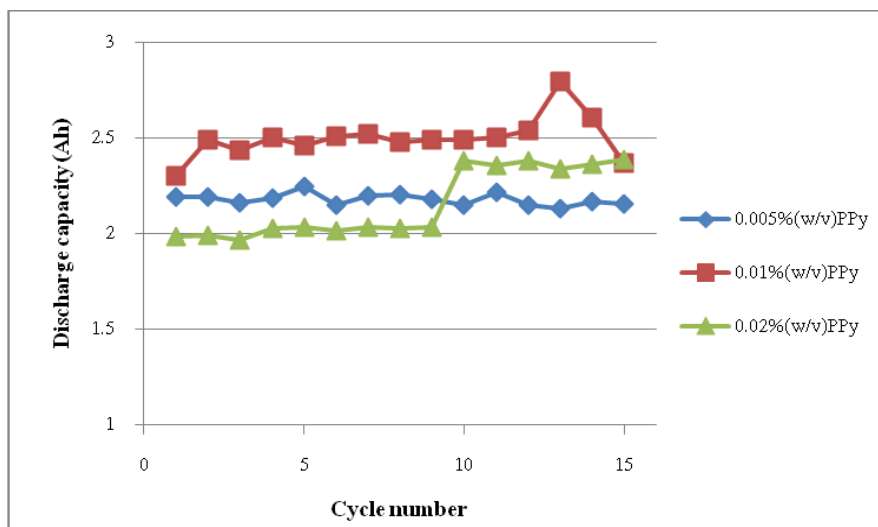
เปรียบเทียบผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 4 แอมป์ จำนวน 15 รอบ ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้น พุ่มซิลิกา ร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และ 7 นาโนเมตร (A300) ผลเป็นดังแสดงในรูป 59 พบว่า เจลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy พุ่ม ซิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการ คายประจุสูงที่สุดโดยมีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุเฉลี่ย 2.50 แอมป์ชั่วโมง โดยพุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุใกล้เคียงกับพุ่มซิลิกา

ขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยมีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุเฉลี่ย 2.40 แอมป์ชั่วโมง ขณะที่พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุต่ำสุด เฉลี่ย 2.09 แอมป์ชั่วโมง



รูปที่ 59 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์ผสมสารเติมแต่ง PPy ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300)

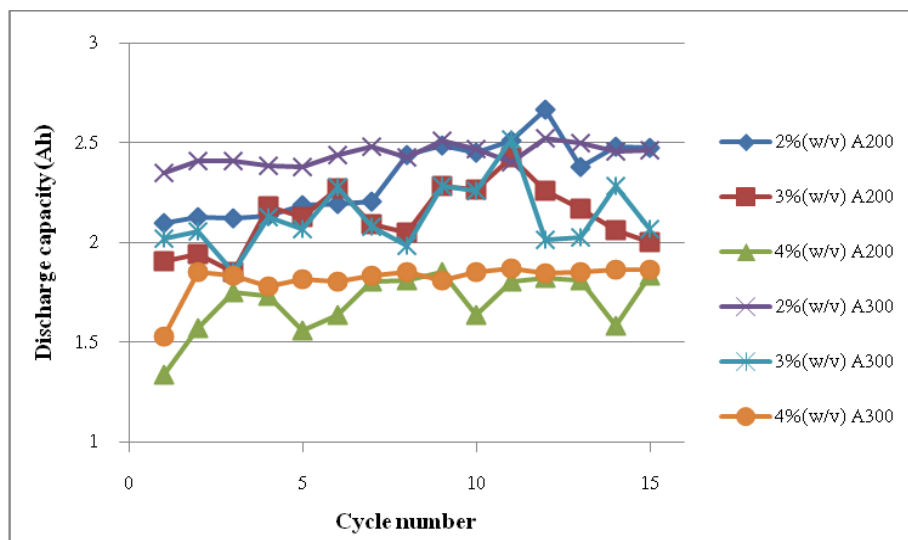
เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุที่ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PPy ต่างๆ โดยนำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นสารเติมแต่ง PPy ร้อยละ 0.005, 0.01 และ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุแสดงดังรูปที่ 60 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PPy มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมอย่างชัดเจน โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PPy ที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดคือความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 2.50 แอมป์ชั่วโมง



รูปที่ 60 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

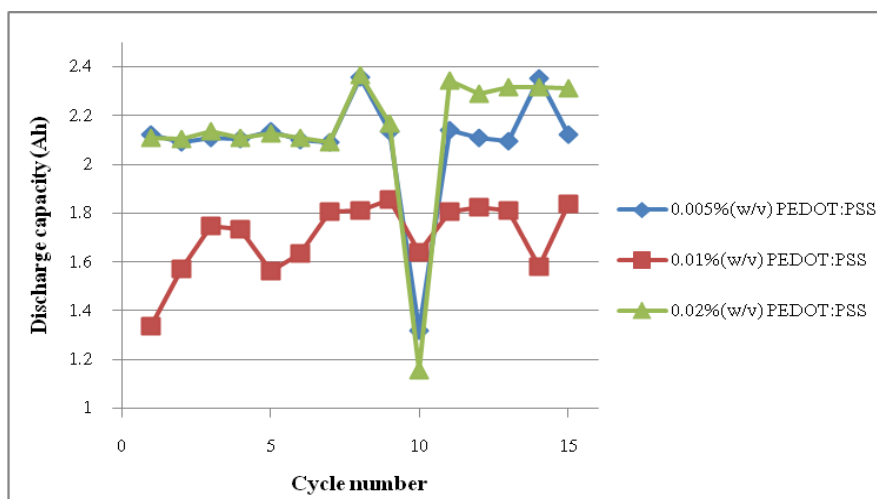
เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS

เปรียบเทียบผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และ 7 นาโนเมตร (A300) ผลเป็นดังแสดงในรูป 61 พบว่า เจลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุสูงที่สุดโดยมีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุเฉลี่ย 2.44 แอมป์ชั่วโมง แต่ยังมีกร้าวหรือซึมของอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีลักษณะของเจลดีที่สุด โดยไม่มีการกร้าวหรือซึมของอิเล็กโทรไลต์ โดยให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุต่ำที่สุด มีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุเฉลี่ย 1.70 แอมป์ชั่วโมง



รูปที่ 61 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300)

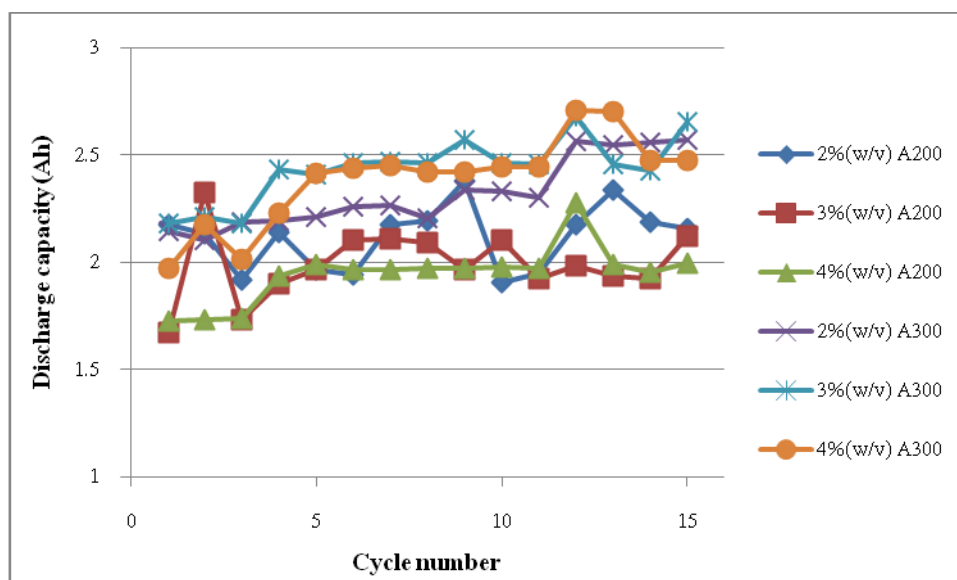
เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุที่ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ต่างๆ โดยนำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พุ่มซิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ร้อยละ 0.005, 0.01 และ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุแสดงดังรูปที่ 62 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PEDOT:PSS มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมอย่างชัดเจน โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดคือ ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 2.14 แอมป์ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติมสารเติมแต่งนั้นเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดนี้ยังมีค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่า



รูปที่ 62 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PEDOT:PSS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 12 นาโนเมตร (A200) ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

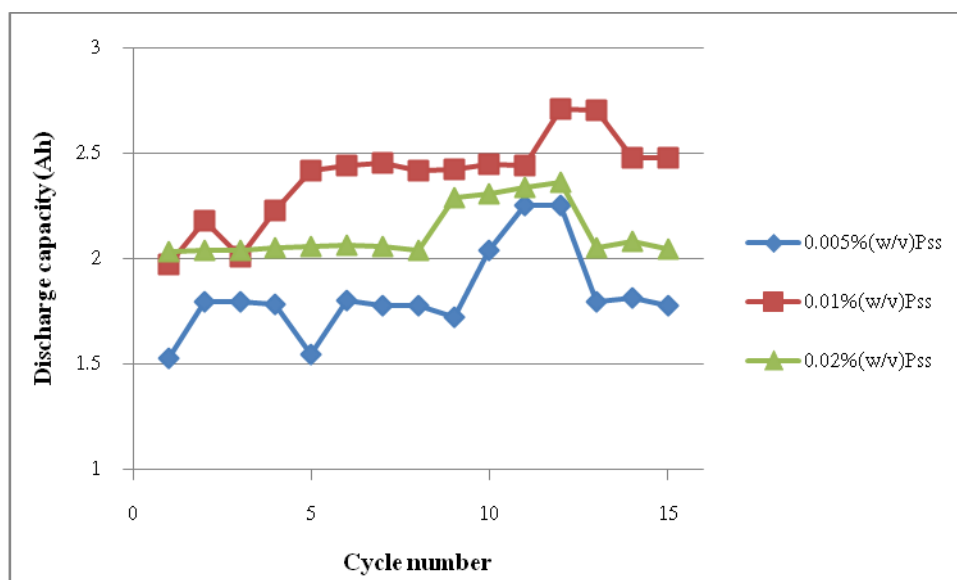
เติมสารเติมแต่ง Pss

เปรียบเทียบผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง Pss ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มชิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 12 นาโนเมตร (A200) และ 7 นาโนเมตร (A300) ผลเป็นดังแสดงในรูป 63 พบว่า เจลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PSS พุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุสูงใกล้เคียงกัน โดยความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุสูงสุดเฉลี่ย 2.43 แอมป์ ชั่วโมง ขณะที่พุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดเฉลี่ยประมาณ 1.90 แอมป์ ชั่วโมง



รูปที่ 63 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลลี่ เล็กโทรไลต์เดิมสารเดิมแต่ง PSS ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300)

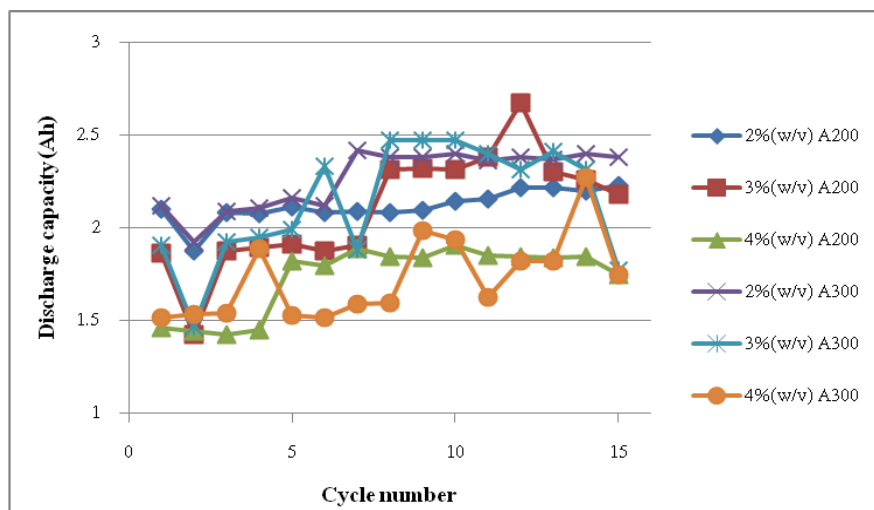
เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุที่ความเข้มข้นของสารเดิมแต่ง PSS ต่างๆ โดยนำเจลลี่เล็กโทรไลต์ที่ใช้พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิกา ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นสารเดิมแต่ง PSS ร้อยละ 0.005, 0.01 และ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุแสดงดังรูปที่ 64 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารเดิมแต่ง PSS มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมอย่างชัดเจน โดยความเข้มข้นของสารเดิมแต่ง PSS ที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดคือความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 2.43 แอมป์ชั่วโมง ขณะที่ความเข้มข้นสารเดิมแต่ง PSS ร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด เฉลี่ย 1.83 แอมป์ชั่วโมง โดยข้อดีของสารเดิมแต่งนี้ นอกจากจะให้ค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแล้วยังสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย



รูปที่ 64 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PSS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 7 นาโนเมตร (A300) ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

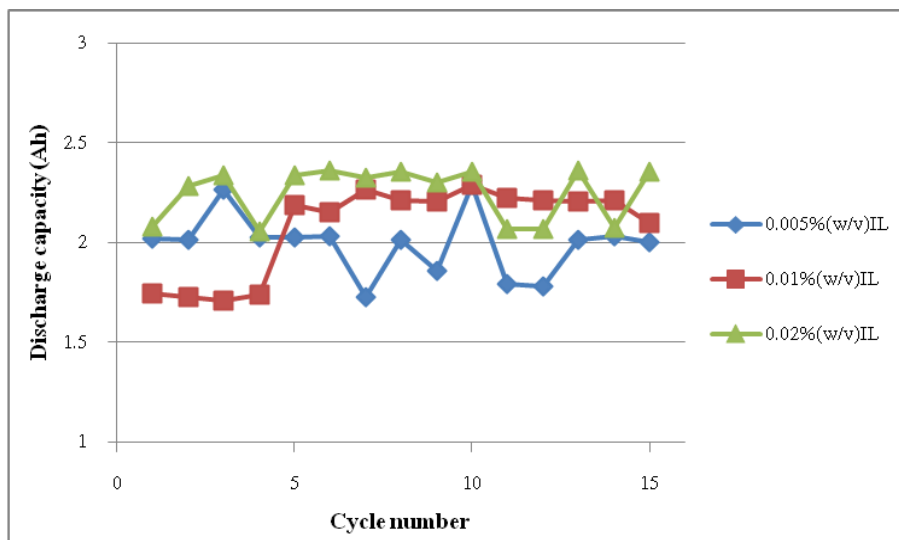
เติมสารเติมแต่ง IL

เปรียบเทียบผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 12 นาโนเมตร (A200) และ 7 นาโนเมตร (A300) ผลเป็นดังแสดงในรูป 65 พบว่า เจลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL พุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุสูงที่สุดโดยมีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุเฉลี่ย 2.26 แอมป์ชั่วโมง แต่ยังมีกรร่วหรือซึมของอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งพุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยรองลงมา คือ 2.14 แอมป์ชั่วโมง ซึ่งลักษณะของเจลดีกว่าความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทั้งนี้การเติมสารเติมแต่ง IL ไม่ช่วยให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นนัก แต่อาจช่วยเสริมความเสถียรให้แก่แบตเตอรี่โดยพุ่มชิลิกานาไดออกไซด์ 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความเสถียรในแต่ละรอบการใช้งานดีที่สุดและมีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 2.12 แอมป์ชั่วโมง



รูปที่ 65 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300)

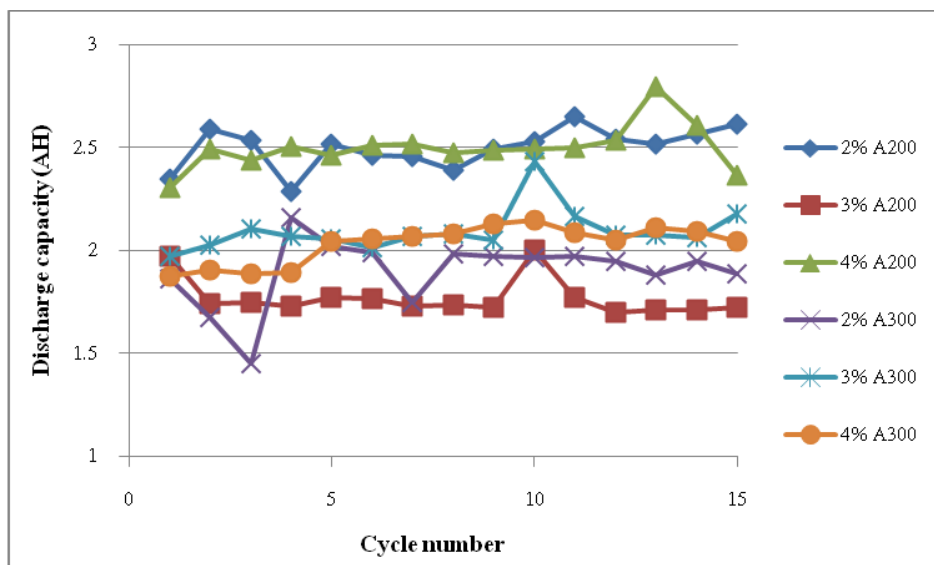
เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุที่ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง IL ต่างๆ โดยนำเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากให้ค่าความจุไฟฟ้าสูง มีลักษณะเป็นเจลและค่อนข้างเสถียร ทดสอบผลของความเข้มข้นสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.005, 0.01 และ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุแสดงดังรูปที่ 66 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง IL มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมเล็กน้อย โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง IL ที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดคือ ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 2.25 แอมป์ชั่วโมง ขณะที่ความเข้มข้นสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความเสถียรมากกว่า โดยให้ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 2.08 แอมป์ชั่วโมง ซึ่งค่าความจุไฟฟ้ายังคงต่ำกว่ามาตรฐาน



รูปที่ 66 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005, 0.01, 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300) ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

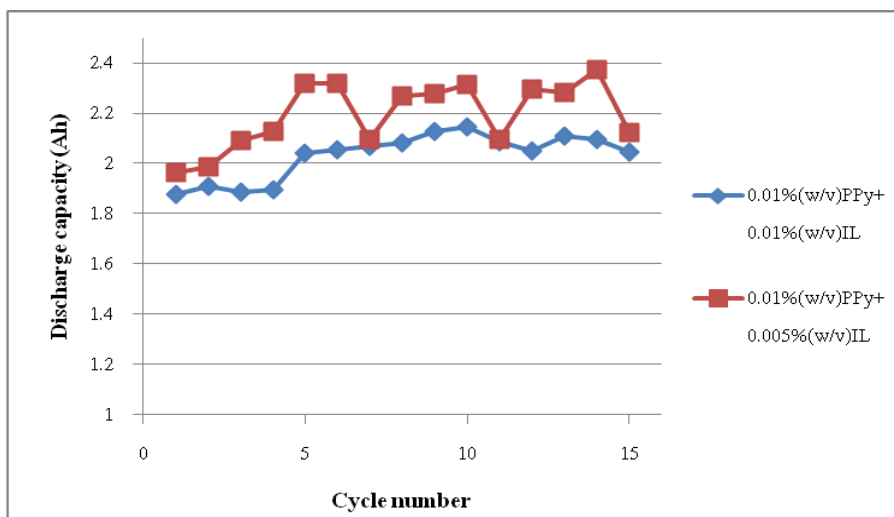
เติมสารเติมแต่ง PPy ผสม IL

เปรียบเทียบผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมสารเติมแต่ง IL ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และ 7 นาโนเมตร (A300) ผลเป็นดังแสดงในรูป 67 พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ผสม IL ที่พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุสูงที่สุดโดยมีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุเฉลี่ย 2.50 แอมป์ชั่วโมง โดยพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีลักษณะการเป็นเจลและมีความเสถียรที่ดีว่าความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขณะที่พุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุต่ำสุด เฉลี่ย 1.77 แอมป์ชั่วโมง



รูปที่ 67 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลลี่ เล็กโพลีไธด์เติมสารเติมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 2-4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) และพุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 7 นาโนเมตร (A300)

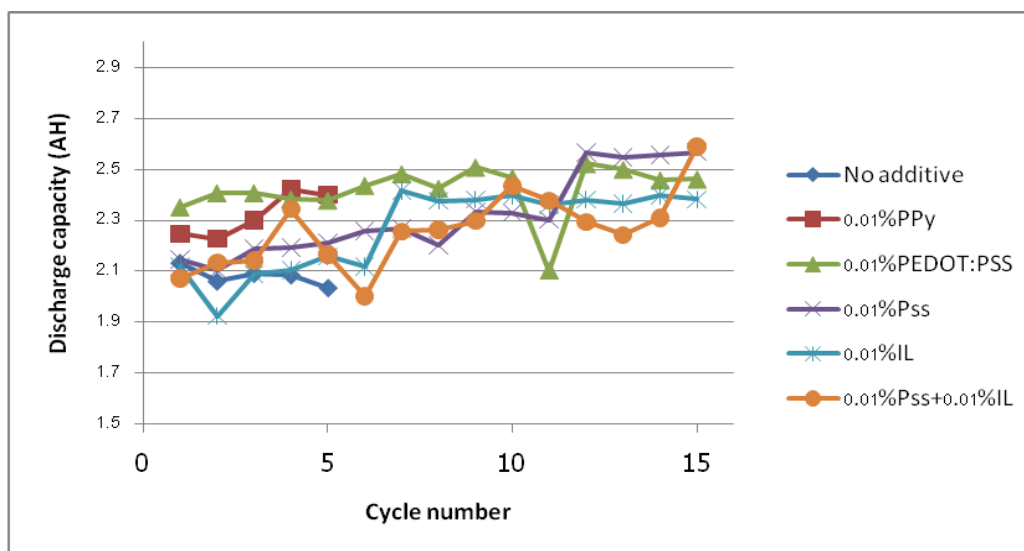
เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุที่ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง PPy ผสม IL ต่างๆ โดยนำเจลลี่เล็กลโพลีไธด์ที่ใช้พุ่มซิลิกานาโนอนุภาค 12 นาโนเมตร ความเข้มข้นพุ่มซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทดสอบผลของความเข้มข้นสารเติมแต่ง PPy ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสม IL ร้อยละ 0.005 และ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งผลของค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุแสดงดังรูปที่ 68 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง IL มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยการผสมสารเติมแต่ง IL ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของเจลแบตเตอรี่ที่มีสารเติมแต่ง PPy ลดลง โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 2.20 แอมป์ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แต่ความเข้มข้นสารเติมแต่ง IL ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความเสถียรมากกว่า



รูปที่ 68 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเจลอิเล็กโทรไลต์เติมสารเติมแต่ง PPy ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมสารเติมแต่ง IL ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.005 และ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พุ่มชิลิกานาอนุภาค 12 นาโนเมตร (A200) ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เติมสารเติมแต่ง PSS ผสม IL

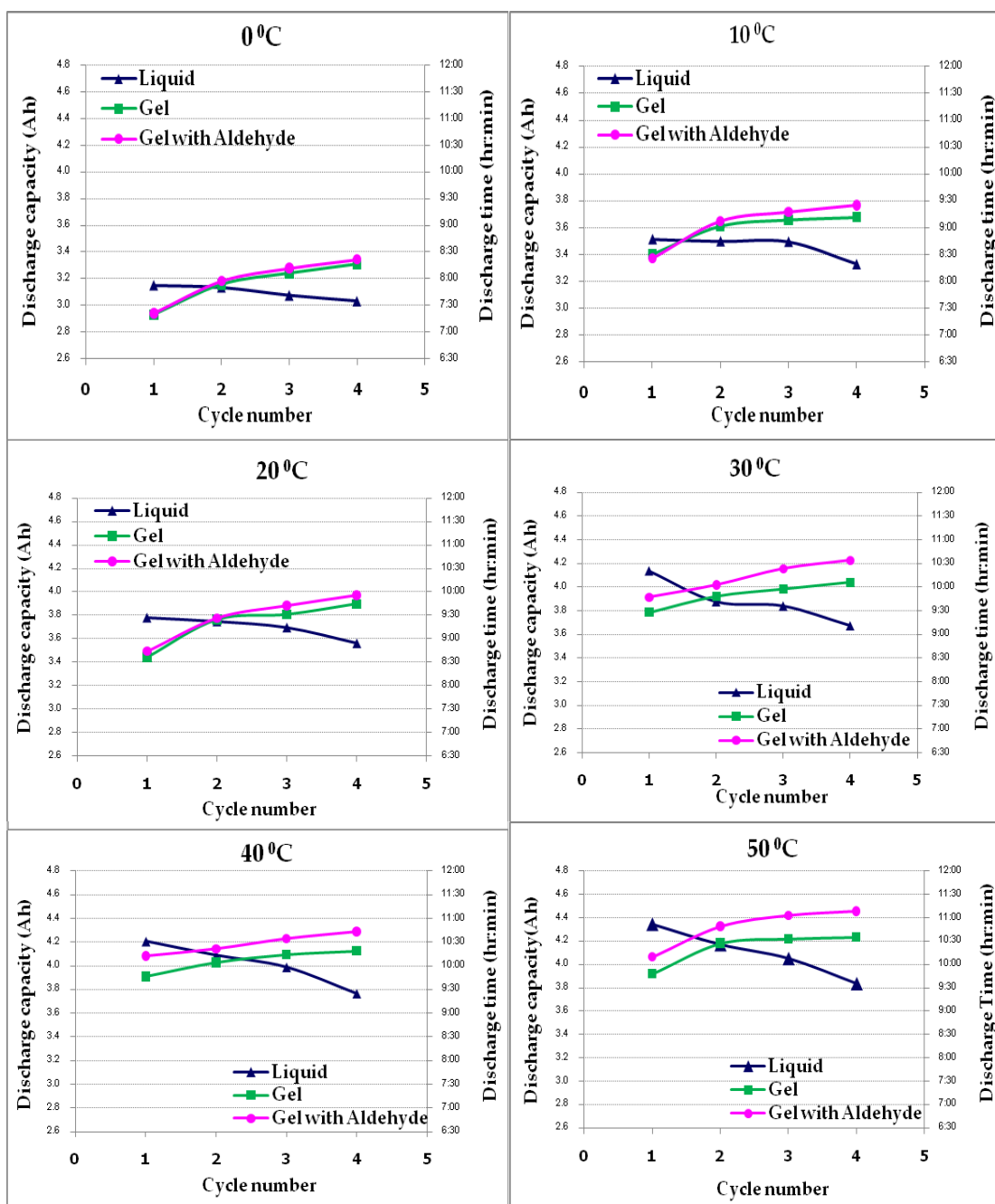
เนื่องจากการเติมสารเติมแต่ง PSS ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรผสม IL ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ความเข้มข้นพุ่มชิลิการ้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลของค่าความจุไฟฟ้าเพียง 2.26 แอมป์ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 69 เมื่อเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งผสมระหว่าง PPy และ IL นั้นให้ผลของความจุไฟฟ้าที่ดีกว่าและยังมีราคาถูกกว่า จึงหยุดทำการทดสอบ

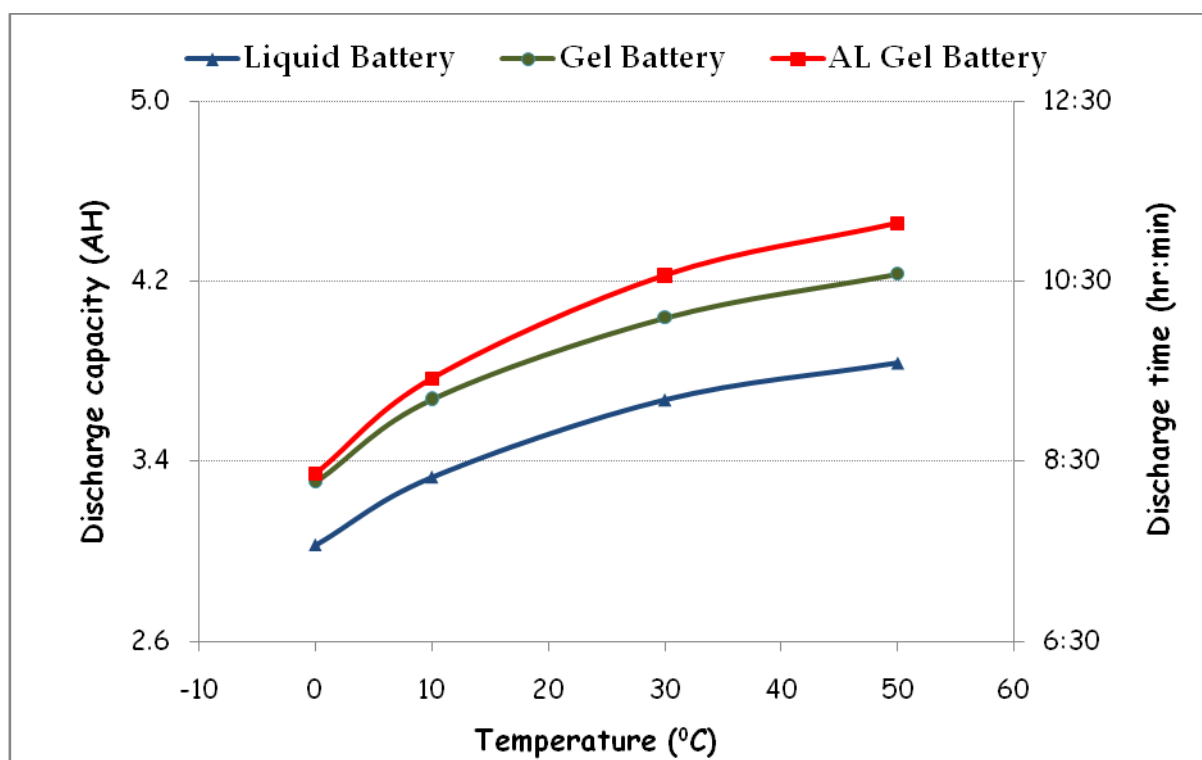


รูปที่ 69 แสดงการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบวาล์วชนิดเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พูนซิลิกา ขนาด 7 นาโนเมตร ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกร้อยละ 43 โดยปริมาตร ความเข้มข้นสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เทียบกับรอบการใช้งาน 15 รอบ

3.2.3 การใช้งานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างๆ

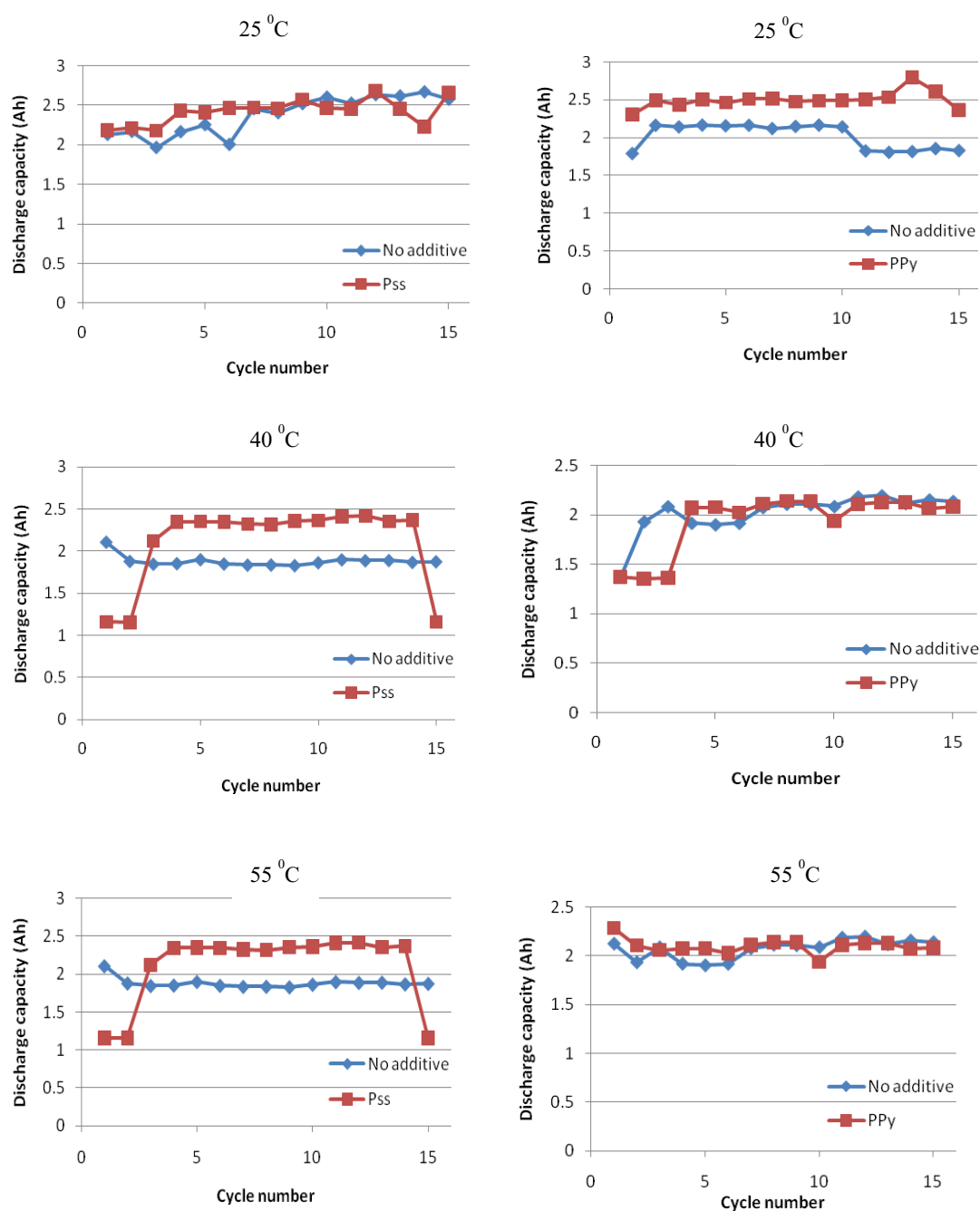
รูปที่ 70 เปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุม ขนาด 4 แอมป์แปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว เจลและเจลที่เติมสารประกอบแอลคิลไฮด์ โดยแสดงค่าความจุในการคายประจุที่อุณหภูมิต่างๆกับจำนวนรอบการทดสอบ ทดสอบที่อัตราการคายประจุต่ำ (0.1 C) พบว่าสารประกอบแอลคิลไฮด์ส่งผลต่อค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยที่เจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งแอลคิลไฮด์จะให้ระยะเวลาในการใช้งานที่ยาวนานที่สุด รองลงมาคือ เจลแบตเตอรี่และแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวในทุกช่วงอุณหภูมิ และจะยิ่งส่งผลเห็นชัดเจนเมื่ออุณหภูมิในการคายประจุสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า เจลแบตเตอรี่จะให้สมรรถนะการใช้งานของแบตเตอรี่หลากหลายช่วงอุณหภูมิมากกว่า และจะให้ค่าความจุในการคายประจุในการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งแอลคิลไฮด์





รูปที่ 70 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุม ขนาด 4 แอมป์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์ต่างกัน โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน ทดสอบที่อัตราเร็วในการคายประจุ 0.1C ที่อุณหภูมิต่างๆ

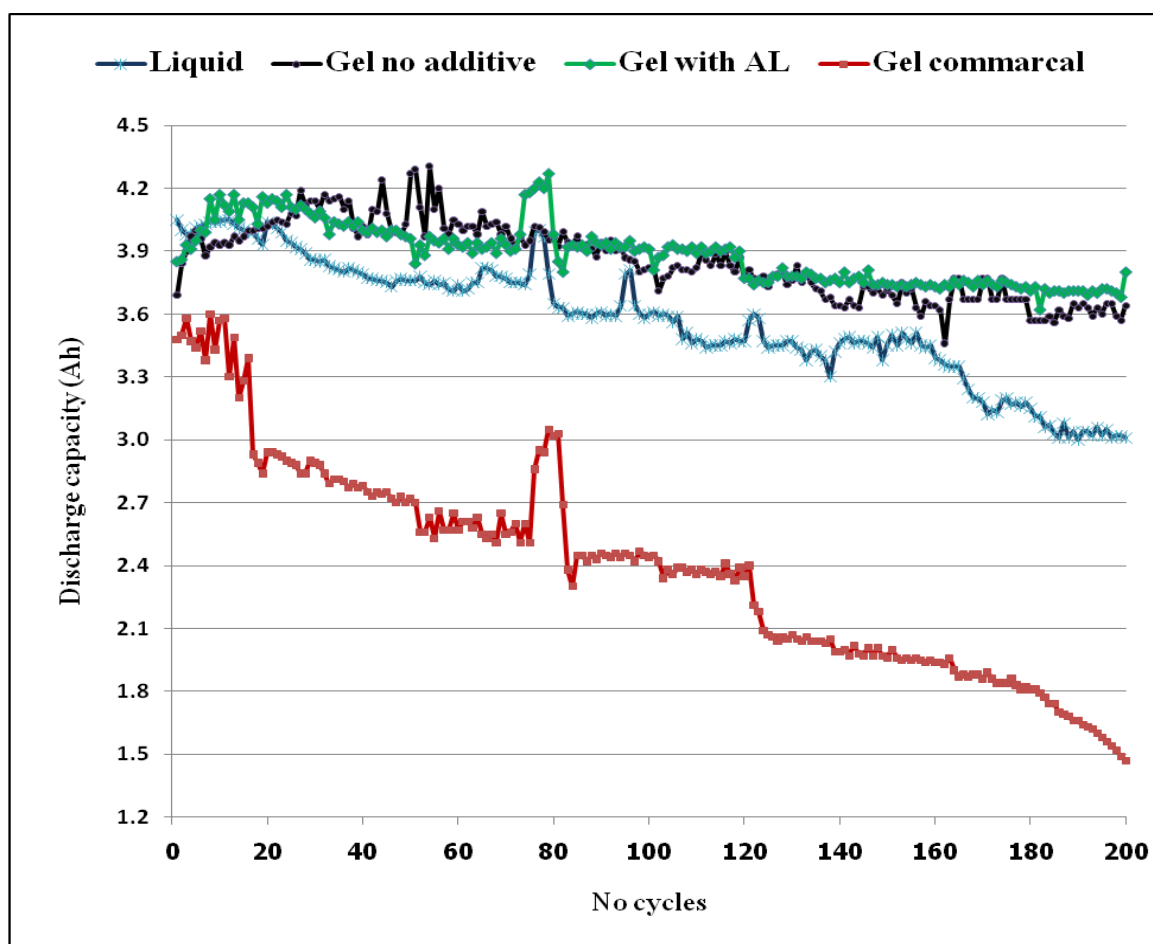
รูปที่ 71 เปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุม ขนาด 4 แอมป์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งและสารเติมแต่ง Pss กับ เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งและสารเติมแต่ง PPy โดยแสดงค่าความจุในการคายประจุที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 55 °C ต่อจำนวนรอบการทดสอบ ทดสอบที่อัตราการคายประจุสูง (1 C) พบว่าสารเติมแต่ง Pss ส่งผลต่อค่าความจุในการคายประจุของแบตเตอรี่ ที่คงที่แม้ว่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งและเติมสารเติมแต่ง PPy จะให้ค่าความ จุไฟฟ้าในการคายประจุที่ลดต่ำลง แต่ทั้งนี้เจลแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบโดยการอัดประจุและคายประจุที่อุณหภูมิสูงนั้นมีแนวโน้มที่ อายุการใช้งาน ของแบตเตอรี่จะ สั้นลง เนื่องจากในการอัดประจุที่อุณหภูมิสูงนั้นกระแสไฟฟ้าจะสามารถเข้าสู่แบตเตอรี่ได้ยากขึ้นซึ่งเกิดจากแรงดันและ ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ เมื่อทำการอัดประจุในเวลาเท่าเดิมแต่แบตเตอรี่จะมีความจุไฟฟ้าได้ไม่เท่าเดิมจึงส่งผลให้ แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่สั้นลง ทั้งนี้สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยเมื่อใช้งานแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสูงจำเป็นต้องใช้เวลาในการอัดประจุนานขึ้น



รูปที่ 71 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุม ขนาด 4 แอมแปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ที่มีอิเล็กโทรไลต์ต่างกัน โดยแสดงค่าความจุแบตเตอรี่และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับการใช้งาน ทดสอบที่อัตราเร็วในการคายประจุ 1C ที่อุณหภูมิต่างๆ

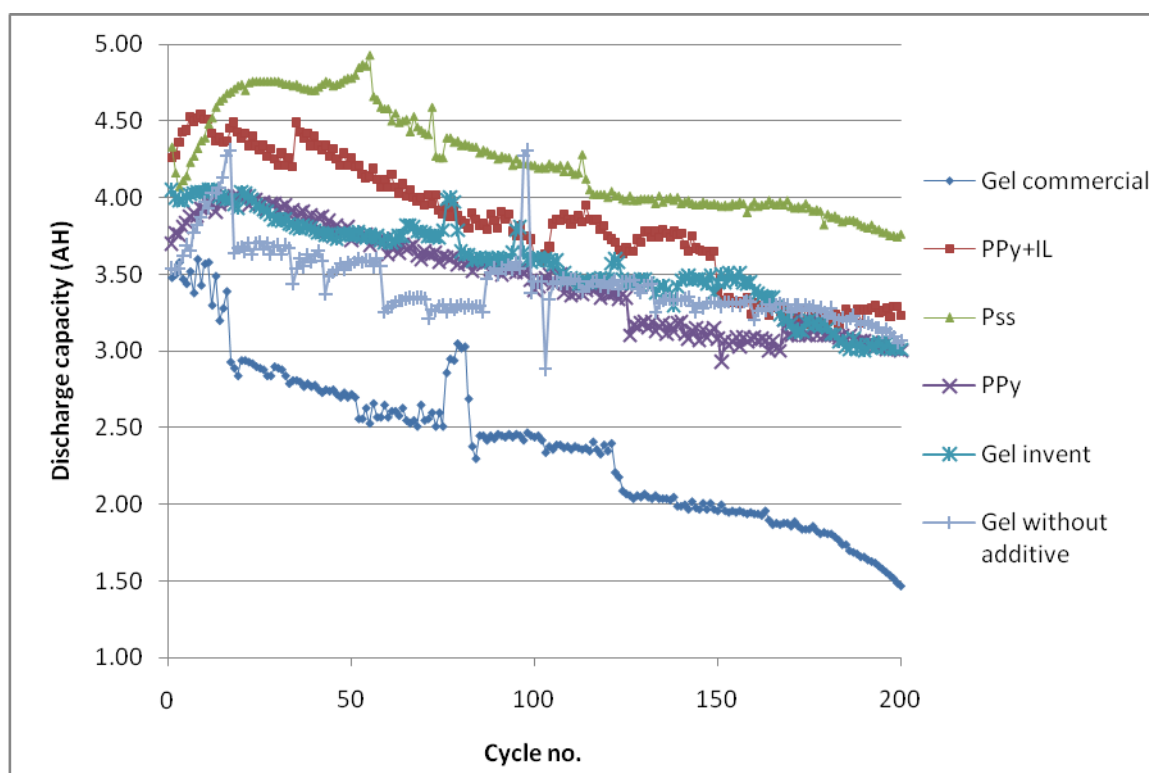
3.2.4 การทดสอบอายุการใช้งาน

รูปที่ 72 เปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ตะกั่ว -กรดแบบมีวาล์วควบคุม ขนาด 7 แอมป์แปร์ - ชั่วโมง 12 โวลต์ ระหว่าง แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติม สารเติมแต่ง แอลดีไฮด์และไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ โดยทดสอบ การคายประจุของ แบตเตอรี่ที่อัตราเร็วสูง (1C) จำนวน 200 รอบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของเจล แบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ ให้ค่าสูงกว่าแบตเตอรี่ เจลแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในท้องตลาดตลอด และแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวทุกช่วงการทดสอบ และให้แนวโน้มอายุการใช้งานที่มาก รวมถึงเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้น โดยปราศจากสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ แสดงให้เห็นว่าเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติม สารเติมแต่งแอลดีไฮด์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของแบตเตอรี่และช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น

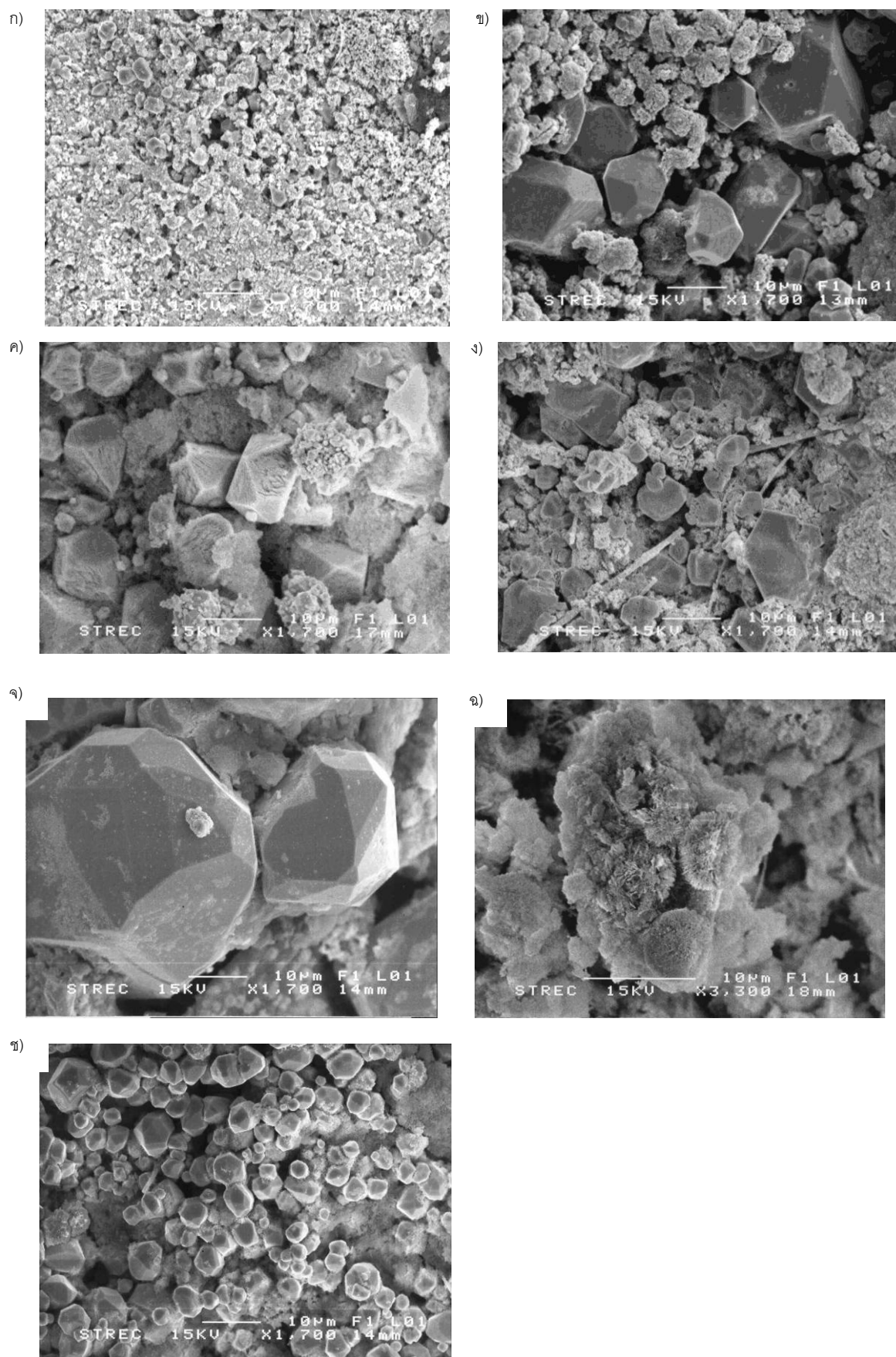


รูปที่ 72 เปรียบเทียบสมรรถนะค่าการคายประจุของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว เจลแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์และไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ ที่อัตราการคายประจุสูง (1 C)

รูปที่ 73 เปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุม ขนาด 7 แอมป์แปร์-ชั่วโมง 12 โวลต์ ระหว่างเจลแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Gel commercial) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติม สารเติมแต่งแอลดีไฮด์ (Gel invent) เจลที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เจลที่เติมสารเติมแต่ง Pss และเจลที่เติมสารเติมแต่ง PPy+IL โดยทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตราเร็วสูง (1C) จำนวน 200 รอบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุของเจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ให้ค่าสูงกว่าแบตเตอรี่เจล แบตเตอรี่ที่มีอยู่ในท้องตลาด โดยเจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์, Pss, PPy และ PPy+IL จะให้ค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกัน โดยเจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่ง PPy+IL จะให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าเล็กน้อย และเจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่ง Pss ให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงที่สุด ขณะที่เมื่อพิจารณาแนวโน้มของอายุการใช้งาน พบว่า เจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์และ PPy จะมีแนวโน้มอายุการใช้งานที่ยาวนานและค่อนข้างคงที่มากกว่า เช่นเดียวกับเจลแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่ง PPy+IL แต่ทั้งนี้เจลแบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะผลิตเป็นแบตเตอรี่เพื่อจำหน่ายเนื่องจากต้นทุนที่สูง และกรรมวิธีการเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ค่อนข้างยุ่งยากกว่าเจลแบตเตอรี่ชนิดอื่น ขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เติมสารเติมแต่ง Pss และเจลแบตเตอรี่ที่นำเข้ามาจำหน่ายในท้องตลาดมีแนวโน้มของอายุการใช้งานที่ลดลงอย่างรวดเร็วในรอบการใช้งานที่สูงกว่า 200 รอบ



รูปที่ 73 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Gel commercial) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ (Gel invent) เจลที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เจลที่เติมสารเติมแต่ง Pss และเจลที่เติมสารเติมแต่ง PPy+IL ที่อัตราการคายประจุสูง (1 C)



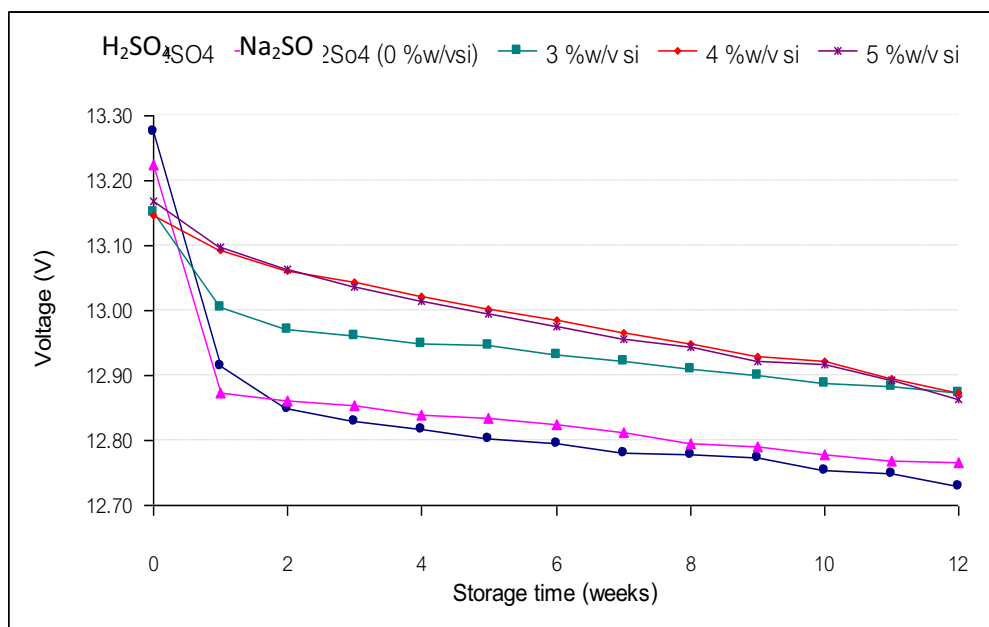
รูปที่ 74 เปรียบเทียบพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าด้านลบของแบตเตอรี่โดยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังการทดสอบอายุการใช้งาน 200 รอบ ที่อัตราการคายประจุสูง (1 C) ก) แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว ข) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ ค) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์เจล ง) แบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จ) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นเติมสารเติมแต่ง PPy ฉ) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นเติมสารเติมแต่ง Pss ช) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นเติมสารเติมแต่ง PPy+IL

รูปที่ 74 เปรียบเทียบพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าด้านลบ (ตะกั่วฟรูน) ของแบตเตอรี่โดยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังการทดสอบอายุการใช้งาน 200 รอบ ที่อัตราการคายประจุสูง (1 C) พบว่าสภาพพื้นผิวของแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะมีสภาพพื้นผิวแตกต่างกันไป และเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่จากการทดสอบข้างต้นต่างกัน คือ ขั้วไฟฟ้าด้านลบของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวแสดงดังรูปที่ 74 ก) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์แสดงดังรูปที่ 74 ข) เจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์เจลแสดงดังรูปที่ 74 ค) จะมีสิ่งเจือปนภายในแบตเตอรี่น้อยกว่าแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแสดงดังรูปที่ 74 ง) สิ่งเจือปนเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ในเรื่องของ การลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือการเพิ่มความต้านทานภายในระบบของแบตเตอรี่ จะส่งผลทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ลดลงนั่นเอง ขณะที่รูปที่ 74 จ)-ช) พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าไม่มีสิ่งเจือปน โดยในรูป 74 จ) ลักษณะพื้นผิวของแผ่นตะกั่วมีผลึกตะกั่วซัลเฟตขนาดใหญ่ ซึ่งจะส่งผลให้เมื่อทำการอัดประจุตะกั่วซัลเฟตไม่สามารถกลับกลายเป็นตะกั่วได้สมบูรณ์ หรือการเกิดเป็นตะกั่วได้ยาก ทำให้มีผลต่ออายุการใช้งานนั่นเอง ขณะที่รูป 74 ฉ) ลักษณะพื้นผิวพบตะกั่วซัลเฟตเช่นกัน แต่ตะกั่วซัลเฟตที่พบมีลักษณะเป็นผลึกอันเนื่องมาจากการเกิดการกัดกร่อนของผิวตะกั่ว ซึ่งน่าจะมีผลที่ต่อการคายประจุเนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพิ่มทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าที่สูง และในการอัดประจุตะกั่วซัลเฟตนี้จะสามารถผันกลับเป็นตะกั่วได้ง่าย แต่ทั้งนี้อาจส่งผลเสียต่อการใช้งานในระยะยาวเนื่องจากการเกิดการกัดกร่อนของพื้นผิวตะกั่วที่สูง รูป 74 ช) ลักษณะตะกั่วซัลเฟตที่พบบนพื้นผิวมีขนาดเล็กแต่มีจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าในการคายประจุและอัดประจุดี และเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ที่เตรียมจากเจลอิเล็กโทรไลต์ที่คิดค้นขึ้นกับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว พบว่า ลักษณะของพื้นผิวต่างกัน คือ ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลวจะมีลักษณะเรียบ พบตะกั่วซัลเฟตฝั่กลึก ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าของเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งแอลดีไฮด์และไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ มีผลึกขนาดใหญ่กว่าแต่อยู่บนพื้นผิว อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะของเหลว ตกเร็วกว่าหรือแนวโน้มอายุการใช้งาน สั้นกว่าเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้น ถ้าเมื่อสังเกตลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าของเจลแบตเตอรี่ที่คิดค้นขึ้นโดยมีการเติม สารเติมแต่งแอลดีไฮด์และไม่มีสารเติมแต่งแอลดีไฮด์ จะให้ลักษณะที่คล้ายกัน ลักษณะของพื้นผิวที่คล้ายกันส่งผลทำให้สมรรถนะของแบตเตอรี่มีค่าใกล้เคียงกัน

3.2.5 ผลการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง

ผลการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองของแบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิเก็บรักษาเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าเมื่อปล่อยแบตเตอรี่ทิ้งไว้ในสถานะวงจรเปิด แบตเตอรี่จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงตามระยะเวลาที่ทิ้งไว้ดังแสดงในรูปที่ 75 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับภายในแบตเตอรี่หรือปฏิกิริยาการคายประจุนั่นเอง นอกจากนี้ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่สามารถบ่งบอกค่าความจุที่ยังคงเหลืออยู่ในแบตเตอรี่ได้ โดยการ

คำนวณและเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์กับค่าความจุของแบตเตอรี่ในตารางที่ 7 ค่าความจุที่ยังคงเหลืออยู่ในแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บแสดงดังรูปที่ 76 และ 77



รูปที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ

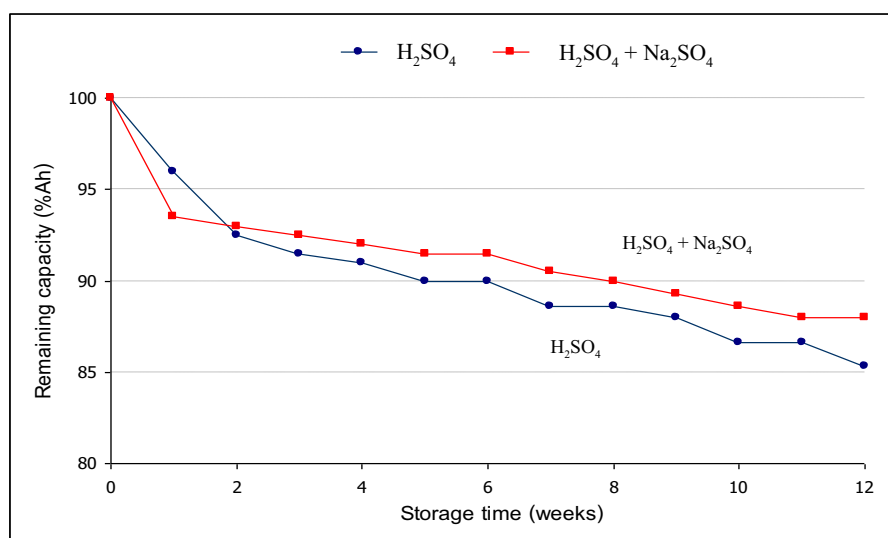
- ผลของสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต

จากรูปที่ 76 พบว่าแบตเตอรี่ที่ทำการเติมสารโซเดียมซัลเฟตลงในอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้อัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองในช่วงเริ่มต้นเร็วกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟต ที่เป็นเช่นนี้มีเนื่องจาก สารโซเดียมซัลเฟตเป็นสารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดี เกิดการแตกตัวเป็น SO_4^{2-} ตัวซัลเฟตไอออนนั้นส่งผลให้เพิ่มอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเอง โดยซัลเฟตไอออนที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็น HSO_4^- ตามสมการที่ 1 และปฏิกิริยานี้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและออกซิเจนดังนั้นอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองจึงเพิ่มขึ้นในช่วงแรก



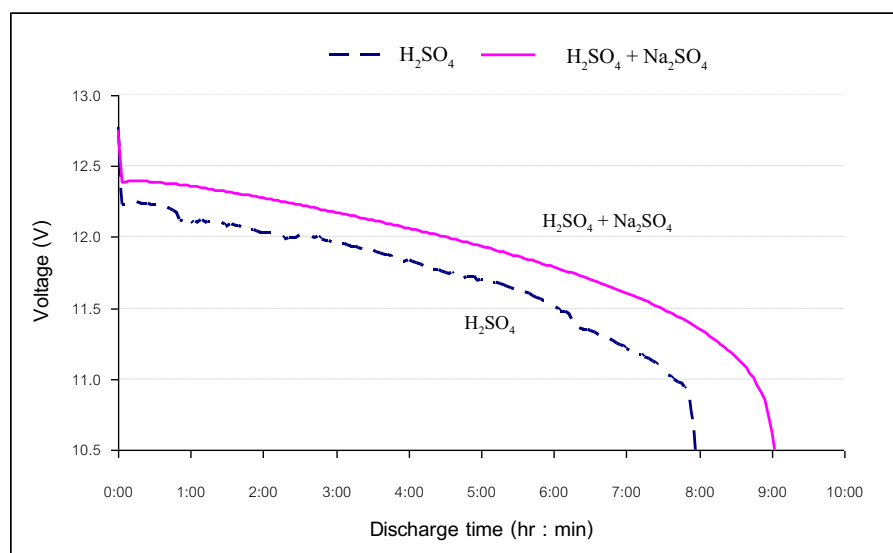
แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาแนวโน้มโดยรวมจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองพบว่าการเติมสารโซเดียมซัลเฟตช่วยลดอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองเล็กน้อย โดยที่ระยะเวลาการเก็บ 3 เดือนแบตเตอรี่ที่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตให้ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ร้อยละ 88 ในขณะที่แบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตให้ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ร้อยละ 85.30 และผลการทดสอบสมรรถนะของ แบตเตอรี่หลังการเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือนดังแสดงในรูปที่ 77 โดยในรูปที่ 77 ก) แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ที่เติมสารโซเดียมซัลเฟตมีความสามารถในการเก็บประจุมากกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมสารโซเดียมซัลเฟต เพราะให้ระยะเวลาในการคายประจุในรอบแรกที่มากกว่านั่นเอง

และเมื่อนำแบตเตอรี่มาทดสอบสมรรถนะในอัตราการคายประจุต่ำจำนวน 5 รอบ แสดงดังรูปที่ 77 ข) พบว่าแบตเตอรี่ที่เติมสาร โซเดียมซัลเฟตยังคงให้ค่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ดีกว่าแบตเตอรี่ที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลเฟตเช่นเดิม

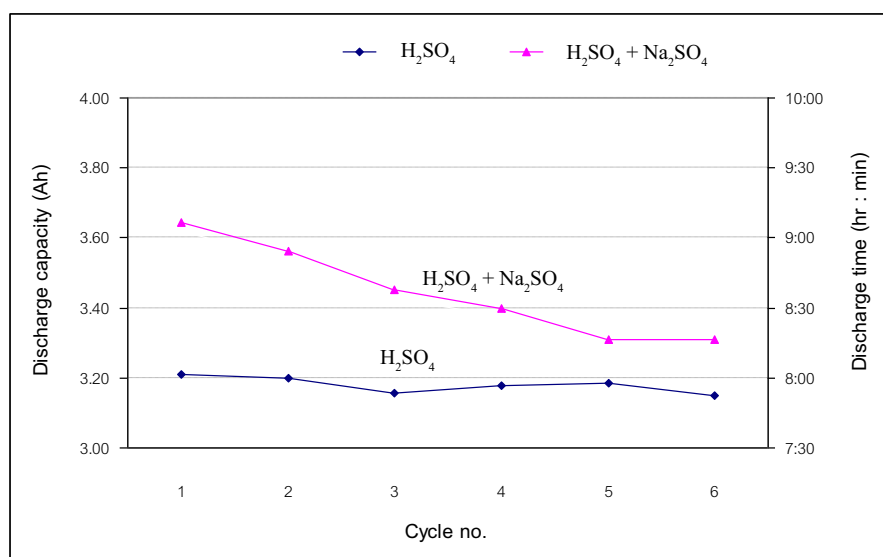


รูปที่ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร

ก)



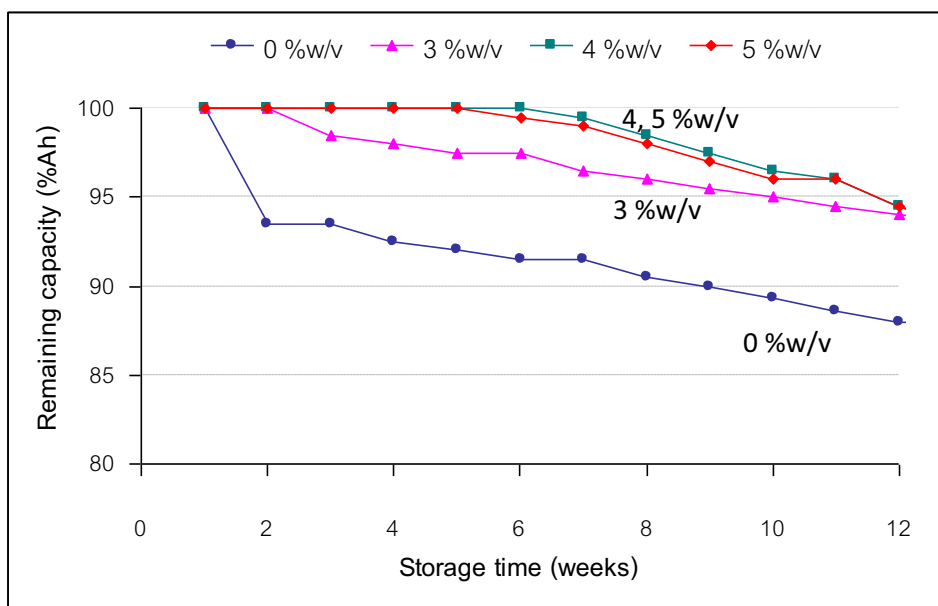
ข)



รูปที่ 77 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเองหลังจากเก็บแบตเตอรี่เป็นเวลา 3 เดือน ระหว่างแบตเตอรี่ที่ไม่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟตและแบตเตอรี่ที่เติมสารเติมแต่งโซเดียมซัลเฟต 13.25 กรัมต่อลิตร ก) แสดงค่าความต่างศักย์และระยะเวลาในการคายประจุรอบแรก ข) แสดงค่าความจุแบตเตอรี่ และระยะเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่กับรอบการใช้งาน

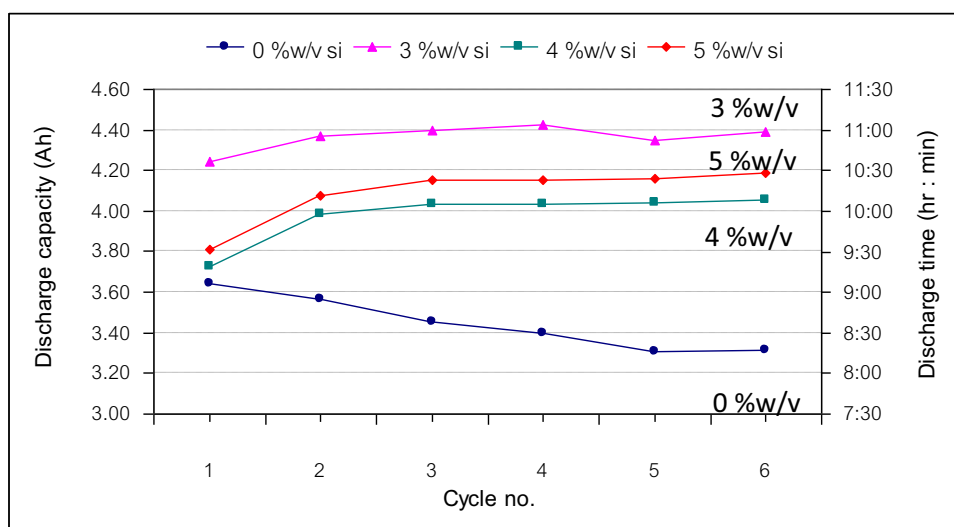
- ผลการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดเหลวและเจลแบตเตอรี่

จากรูปที่ 78 พบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเหลว (0 %w/v) มีอัตราเร็วในการคายประจุด้วยตัวเองเร็วกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเจลค่อนข้างมาก โดยเมื่อสิ้นสุดการเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือนพบว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเหลวเก็บความจุของแบตเตอรี่ได้ร้อยละ 88 ในขณะที่เจลแบตเตอรี่จะเก็บความจุของแบตเตอรี่ได้ร้อยละ 93 แสดงว่าเจลแบตเตอรี่ที่วิจัยขึ้นช่วยลดอัตราในการคายประจุเองประมาณร้อยละ 6 และเมื่อเปรียบเทียบเจลแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 3, 4 และ 5 %w/v พบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 4 และ 5 %w/v มีความสามารถในการเก็บประจุได้เต็มในช่วง 5-6 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นจึงเริ่มคายประจุด้วยตัวเอง ในขณะที่เจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากฟุ้งซิลิกา 3 %w/v มีความสามารถในการเก็บประจุได้เต็มในช่วง 2 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นจึงเริ่มคายประจุด้วยตัวเอง



รูปที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความจุประจุของแบตเตอรี่กับระยะเวลาในการเก็บ เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสถานะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณพุ่มซิลิกาต่าง ๆ

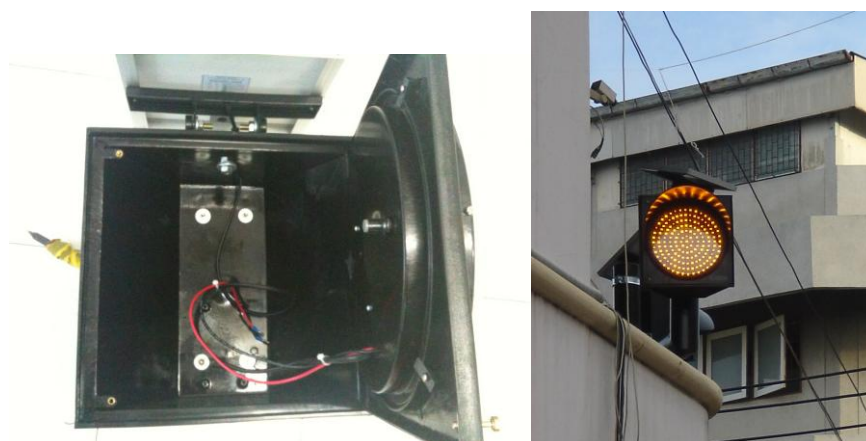
หลังการเก็บแบตเตอรี่เป็นระยะเวลา 3 เดือน ได้นำแบตเตอรี่เหล่านั้นมาทำการทดสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่อัตราการคายประจุต่ำดังแสดงในรูปที่ 79 พบว่าเจลแบตเตอรี่ให้สมรรถนะดีกว่าแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะของเหลว โดยเจลแบตเตอรี่จะให้ลักษณะแนวโน้มของการคายประจุของแบตเตอรี่ในรอบแรกที่ดีจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ ส่วนแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะเหลวจะให้ค่าความจุในการคายประจุรอบแรกที่สูงเช่นเคย แต่จะลดลงจนกระทั่งถึงที่ โดยมีค่าความจุที่ต่ำกว่าเจลแบตเตอรี่ทุกอันตลอดการทดสอบ โดยเมื่อพิจารณาค่าความจุการคายประจุในรอบแรกจะพบว่าเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากพุ่มซิลิกา 4 และ 5 %w/v จะให้ค่าใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์ในสถานะเหลว ขณะที่ร้อยละความจุของแบตเตอรี่หลังการเก็บรักษาต่างกัน (รูปที่ 78) ที่เป็นเช่นนี้เพราะคุณสมบัติการเป็นไทโซทรอปิกของเจล เมื่อเจลแบตเตอรี่ถูกเก็บเป็นระยะเวลานานไม่มีการใช้หรือไม่มีการให้แรงกับเจล จะทำให้เจลเพิ่มความแข็งแรงขึ้น การเคลื่อนที่ของไอออนภายในแบตเตอรี่จึงทำได้ยาก ดังนั้นในรอบแรกของการทดสอบหลังการเก็บจึงให้ค่าความจุในการคายประจุที่ต่ำกว่าที่ควร



รูปที่ 79 เปรียบเทียบสมรรถนะการคายประจุของแบตเตอรี่หลังการทดสอบการคายประจุด้วยตัวเอง (3 เดือน) ระหว่างแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสภาวะเหลวและเจลแบตเตอรี่ที่เตรียมจากปริมาณฟลูมซิลิกาต่าง ๆ

3.2.6 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ในอุปกรณ์ไฟกระพริบ (สำหรับการใช้งานจริง)

การทดสอบแบตเตอรี่สำหรับใช้งานจริงได้ทำการทดสอบในอุปกรณ์ไฟกระพริบระบบเซลล์สุริยะ (Solar cell) ดังรูป 80 โดยเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ตะกั่ว - กรดแบบมีวาล์วควบคุมชนิดน้ำและเจลแบตเตอรี่ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ ซึ่งก่อนทำการทดสอบได้ทำการคัดเลือกแบตเตอรี่ชนิดน้ำที่มีความต่างศักย์และคุณสมบัติใกล้เคียงกับเจลแบตเตอรี่มากที่สุด และเมื่อทำการทดสอบในช่วงแรกนั้นแบตเตอรี่ทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกัน โดยแบตเตอรี่ชนิดน้ำจะให้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าเจลแบตเตอรี่ในช่วงแรก ต่อมาเมื่อผ่านการใช้งาน 6 เดือน พบว่า แบตเตอรี่ชนิดน้ำให้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าเท่ากับเจลแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นไปได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดน้ำมีแนวโน้มที่จะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าเจลแบตเตอรี่ แต่ทั้งนี้ ยังคงต้องทำการทดสอบต่อไปเนื่องจากระยะเวลา 6 เดือน อาจไม่เพียงพอที่จะสรุปได้ แต่จากการทดสอบการใช้งานใน 6 เดือนนี้แบตเตอรี่ทั้งสองยังคงสามารถอัดและคายประจุได้อย่างปกติและให้ประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 81

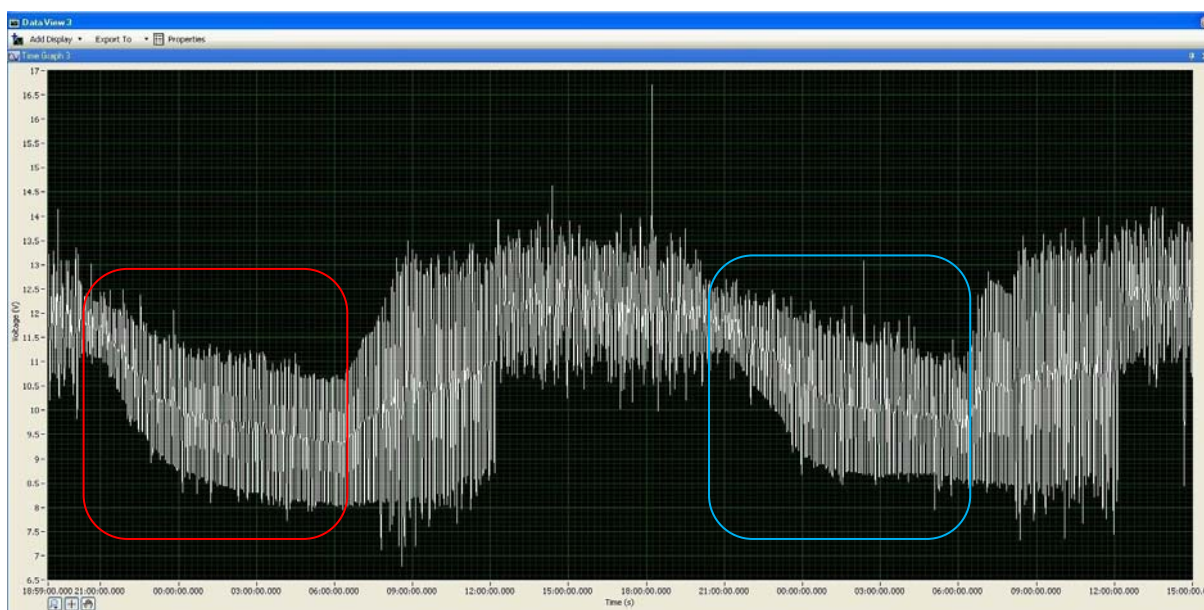


รูปที่ 80 อุปกรณ์ไฟกระพริบระบบเซลล์สุริยะ ก) ภายในอุปกรณ์สำหรับติดตั้งแบตเตอรี่ ข) เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ไฟกระพริบ

ก)



ข)



รูปที่ 81 ผลการทดสอบการใช้งานแบตเตอรี่กับอุปกรณ์ไฟกระพริบ ก) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา ข) แสดงค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลา

จากรูปที่ 81 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการ ใช้งานจริงของแบตเตอรี่ โดยทำการติดตั้งเจลแบตเตอรี่และ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วควบคุมชนิดน้ำในอุปกรณ์ไฟกระพริบทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นเวลา 6 เดือน ซึ่งในรูปนั้นเป็นผลการทดสอบที่ถัดมาเพียงแค่ 1 รอบในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น โดยในรอบสีแดงและสีฟ้า ของทั้งรูป 81 ก) และ ข) คือ ช่วงที่แบตเตอรี่ เกิดการคายประจุ ส่วนกราฟที่อยู่นอกกรอบสีแดงและสีฟ้า คือส่วนที่เกิดการ

อัดประจุ โดยไฟกระพริบจะเปล่งแสงได้ดีในช่วง ของกรวยสีแดงและสีฟ้า นี้ ในรูป 81 ก) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับ เวลาโดยกรวยสีแดงเป็นการคายกระแสไฟฟ้าของเจลแบตเตอรี่ ขณะที่ในกรวยสีฟ้าเป็นการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วชนิดน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าของเจลแบตเตอรี่จะสูงกว่าและมีระยะเวลาในการคายนานกว่า ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับรอบการใช้งานบางครั้งเจลแบตเตอรี่จะให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการคายป ะจุที่ต่ำกว่า แต่โดยรวมเจลแบตเตอรี่จะให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบมีวาล์วชนิดน้ำเล็กน้อย ขณะที่ใน รูป 81 ข) แสดงผลของค่าความต่าง ศักย์เทียบเวลา พบว่า ความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว- กรดแบบมีวาล์วชนิดน้ำมีค่าสูงกว่าเจลแบตเตอรี่เล็กน้อย แต่ มีช่วงเวลาการใช้งานที่สั้น เนื่องจากค่าความต่างศักย์ลดลงจนถึงจุดตัดอย่างรวดเร็ว จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพของเจลแบตเตอรี่ที่ดีกว่า แต่ทั้งนี้แบตเตอรี่ทั้งสองยังคงสามารถใช้งานได้แม้จะผ่านไ 6 เดือน เนื่องด้วย ระยะเวลาที่จำกัดจึงยังไม่สามารถบรรลุผลในด้านอายุการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ได้

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมานั้น สูตรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ได้แก่ เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เติมน้ำตาลเติม แต่งแอลดี ไฮด์และ PPy ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้พูนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร เติมน้ำตาลเติมแต่ง Pss ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยทั้งสามสูตรนี้ส่งผลให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพ ที่ดีกว่าเจลแบตเตอรี่ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทั้งด้านค่าความจุไฟฟ้าที่อัตราการคายประจุต่างๆ การใช้งานที่อุณหภูมิสูง การ ใช้งานในอุปกรณ์ไฟกระพริบ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานเกิน 200 รอบ นอกจากนี้แบตเตอรี่ที่ใช้เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ คิดค้นขึ้นนี้ยังมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ต่างกัน โดยสารเติมแต่ง ง Pss สามารถบ่งบอกอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยการ เปลี่ยนสี สารเติมแต่งแอลดีไฮด์ช่วยลดการสูญเสียน้ำได้ดี เป็นต้น ซึ่งเจลแบตเตอรี่ที่ได้นี้สามารถใช้งานได้หลากหลายโดย ไม่มีการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน สา มารถนำไปติดตั้งใน อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ได้ทั้งแนวตั้ง แนวนอนซึ่งเป็นประโยชน์ต่ออุปกรณ์บางชนิดที่มีพื้นที่จำกัด ไม่ต้องบำรุงรักษา มีอายุการ ใช้งานยาวนาน แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการอัดประจุที่ไม่สามารถอัดประจุในอัตราสูงได้ซึ่งอาจจะต้องทำการพัฒนาต่อไป

ในส่วนของผล การทดสอบเจลอิเล็กโทรไลต์พบว่า การวัดค่าการนำไฟฟ้าไม่สามารถหาสูตรอิเล็กโทรไลต์ที่ เหมาะสมได้ สามารถใช้ในการบ่งชี้แนวโน้มเบื้องต้นได้เท่านั้น ขณะที่การหาอัตราการสูญเสียด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีสามารถบ่งบอกอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จากการสูญเสียของอิเล็กโทรไลต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

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. หลักสูตรฝึกอบรมเทคนิคการ ประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับ
ผู้ใช้งานระบบ [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](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](http://www.battcon.com/paperfinal_2007/rushpaper2007.pdf) [2010, January 23].

Output

Output		กรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ท่านระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ท่านดำเนินการ
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการ ปรับเปลี่ยน	ผลสำเร็จ (%)	
1. คิดค้นสูตรและเทคโนโลยีเจลอิเล็กโตรโพลด์ใหม่ ควบคู่กับการศึกษาหาความรู้เพิ่มเติม	100	
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลอิเล็กโตรโพลด์	100	
3. ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเจลอิเล็กโตรโพลด์ที่เตรียมขึ้น	100	
4. ศึกษาเทคนิคการบรรจุเจลอิเล็กโตรโพลด์ลงในแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุด	100	
5. ทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบวาล์ว ที่บรรจุเจลอิเล็กโตรโพลด์ที่เตรียมขึ้น		
5.1 ทดสอบความสามารถในการอัดประจุและคายประจุ	100	
5.2 นำแบตเตอรี่ที่ทำขึ้นได้ไปทดสอบใช้จริง	100	