การเตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจากพอลิพรอพิลีนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

นางสาวเอื้องดาว จันทร์ดร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3599-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I22154194X

PREPARATION OF BIPOLAR PLATE FROM POLYPROPYLENE FOR PEM FUEL CELL

Miss Auangdaw Jundon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3599-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจากพอลิพรอพิลีนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
โดย	นางสาวเอื้องดาว จันทร์ดร
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. มะลิหุ่นสม)

นางสาวเอื้องดาว จันทร์ดร : การเตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจากพอลิพรอพิลีนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (PREPARATION OF BIPOLAR PLATE FROM POLYPROPYLENE FOR PEM FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. เก็จวลี พฤกษาทร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 94หน้า. ISBN 974-17-3599-5.

ทางเลือกหนึ่งของการเตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนคือ การเตรียมจากพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา การนำไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมในงานวิจัยนี้ พบว่าผลกระทบร่วมในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว โดยพอลิเมอร์คอมโพลิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 20 กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดประมาณ 3.3 ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อพิจารณาต้นทุนในการผลิต พบว่าการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีต้นทุนต่ำสุด การเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตทำได้โดยการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งการเติมซิงค์สเตียเรท 5 phr ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 phr ในพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 5.006 ซีเมนส์/เซนติเมตร อีกทั้งยังพบว่าการเติมสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดนี้ ส่งผลให้ความหนาแน่นและความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับน้ำและความแข็งแรงโค้งงอลดลง

ภาควิชา..... เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต เอื้องดาว จันทร์ดร

สาขาวิชา..... เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา..... 2548..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4572602223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: BIPOLAR PLATE/ CONDUCTIVE FILLER / COMPOSITE POLYMER

AUANGDAW JUNDON : PREPARATION OF BIPOLAR PLATE FROM POLYPROPYLENE FOR PEM FUEL CELL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph. D. THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMSAK WORAMONGKOLCHAI, Ph. D., 94 pp. ISBN 974-17-3599-5.

An alternative preparation of bipolar plate materials for proton exchange membrane fuel cell was polymer composites prepared with conductive fillers. The study of the morphology, electrical conductivity, physical and mechanical properties of polymer composite prepared in this work showed that synergistic effect of acetylene black and carbon fiber in polymer composites provided higher electrical conductivity than that of the single filler in polymer composites. The polymer composites of acetylene black 20 wt% with carbon fiber 30 wt%, acetylene black 30 wt% with carbon fiber 20 wt% and acetylene black 40 wt% with carbon fiber 10 wt% possess the highest electrical conductivity of 3.3 S/cm. The cost evaluation of polymer composites showed that polymer composites of acetylene black 40 wt% with carbon fiber 10 wt% had the lowest cost. The conductivity of polymer composites can be improved by adding zinc sterate 5 phr and titanium dioxide 3 phr in polymer composites acetylene black 40 wt% with carbon fiber 10 wt%. It provides the best electrical conductivity of 5 S/cm. Zinc sterate and titanium dioxide increased the density and hardness, but decreased the water absorption and flexural strength of polymer composites.

Department .....Chemical Technology ... Student's signature Auangdaw Jundon

Field of study ....Chemical Technology ... Advisor's signature .....

Academic year ..... 2005..... Co- advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยภายใต้ทุนรัชดาภิเษกสมโภช

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบคุณ บริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัด มหาชน ที่ให้ความอนุเคราะห์ อะเซทิลีนแบล็คและพอลิพรอพิลีนเพื่อใช้ในงานวิจัย จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ในการใช้เครื่องมือในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพซิต รวมถึงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และน้องชายที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง 4

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 6

2.3 การผลิตแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว 9

2.4 คอมโพสิต 17

2.4.1 ส่วนเมตริกซ์ 19

2.4.2 ส่วนเสริมแรง 21

2.5 การขึ้นรูปคอมโพสิต 22

2.5.1 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูป 22

2.5.2 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคอัดแบบขึ้นรูป 23

2.5.3 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการดึงรีด 24

2.5.4 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการม้วนพัน 25

2.5.5 การขึ้นรูปคอมโพสิตแบบถ่ายเทเรซินขึ้นรูปหรืออาร์ทีเอ็ม 26

2.6 พอลิพรอพิลีน 27

2.6.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน 27

2.6.2 การใช้ประโยชน์พอลิพรอพิลีน 30

2.7 เส้นใยคาร์บอน 31

บทที่ หน้า

2.7.1 กระบวนการเตรียมเส้นใยคาร์บอน..... 31
2.8 คาร์บอนแบล็ค..... 33
2.9 แกรไฟต์..... 35
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 36
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง..... 40
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 40
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 40
3.3 การดำเนินการวิจัย 41
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า..... 41
3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง..... 41
3.3.3 เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ..... 42
3.3.4 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy..... 43
3.3.5 วัดค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตตามมาตรฐาน ASTM C611.... 43
3.3.6 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 43
3.3.7 ทดสอบการดูดซับน้ำตามมาตรฐาน ASTM D570..... 44
3.3.8 ทดสอบการโค้งงอตามมาตรฐาน ASTM D790..... .44
3.3.9 ทดสอบความแข็งของชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Hardness Testing ตามมาตรฐาน D785 – 98..... 44
3.3.10 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 45
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 46
4.1 สมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า 46
4.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต 48
4.2.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว..... 48
4.2.1.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค..... 48
4.2.1.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์..... 48

บทที่ หน้า

4.2.1.3 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน..... 50
4.2.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน 51
4.3 การศึกษาการนำไฟฟ้าของพอสิเมอร์คอมโพสิต..... 51
4.3.1 การนำไฟฟ้าของพอสิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว 51
4.3.2 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน 54
4.4 สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 57
4.4.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 58
4.4.1.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว..... 58
4.4.1.2 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน 59
4.4.2 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 60
4.4.2.1 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว 60
4.4.2.2 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน..... 62
4.4.3 ความโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 63
4.4.3.1 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว..... 63
4.4.3.2 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน..... 65
4.4.4 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิต 67
4.4.4.1 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว 67
4.4.4.2 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน 67

บทที่ หน้า

4.5 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต 69
4.5.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของสารเติมแต่งและพอลิเมอร์คอมโพสิต 70
4.5.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่ง..... 72
4.5.3 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต 72
4.5.4 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 74
4.5.5 การดูดซับน้ำของพอสิเมอร์คอมโพสิต 75
4.5.6 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิต 76
4.5.7 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิต 77
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 80
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 80
5.2 ข้อเสนอแนะ 81
รายการอ้างอิง..... 82
ภาคผนวก..... 86
ภาคผนวก ก..... 87
ภาคผนวก ข..... 89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 94

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 วัสดุที่ใช้เคลือบโลหะสำหรับทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว 13

2.2 กระบวนการเคลือบโลหะ 14

2.3 วัสดุที่ใช้ทำคาร์บอนคอมโพสิตสำหรับแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว 15

2.4 สมบัติของพอลิพรอพิลีน 28

3.1 ส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิต 42

3.2 องค์ประกอบของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์คอมโพสิต 45

4.1 สมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า 46

4.2 การนำไฟฟ้าของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วแบบคอมโพสิต 56

4.3 เปรียบเทียบการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต 57

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์อคอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน ระหว่างอะเซทิลีนกับเส้นใยคาร์บอนกับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว 69

4.5 ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต 70

4.6 ราคาในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้หนึ่งกิโลกรัม 70

4.7 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่งกับงานวิจัยของ Cho และคณะ 79

ข-1 ความต่างศักย์ของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก 89

ข-2 น้ำหนักและปริมาตรของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก 91

ข-3 น้ำหนักของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังแช่น้ำ 92

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ หน้า

2.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 8
2.2 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 9
2.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นคอมโพสิต 16
2.4 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน 18
2.5 การจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต 20
2.6 การจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก 21
2.7 เครื่องฉีดขึ้นรูป 23
2.8 เครื่องอัดแบบขึ้นรูป 24
2.9 เทคนิคการขึ้นรูปแบบดึงรีด 25
2.10 เทคนิคการขึ้นรูปแบบม้วนพัน 26
2.11 เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบถ่ายเทเรซินหรืออาร์ทีเอ็ม 27
2.12 โครงสร้างของพอลิพรอพิลีน 27
2.13 โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน 28
2.14 โครงสร้างของซินดิโอแทกติกพอลิพรอพิลีน 29
2.15 โครงสร้างของอะแทกติกพอสิพรอพิลีน 29
2.16 กระบวนการผลิต PAN-based fiber 32
2.17 กระบวนการผลิต Pitch-based fiber 32
2.18 รูปร่างของคาร์บอนแบล็ค 34
2.19 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค 35
2.20 การเกิดเรโซแนนซ์ของแกรไฟต์ในชั้นเดียวกัน 35
2.21 แบบจำลองแสดงโครงสร้างของแกรไฟต์ 36
3.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Four-point probe 43
3.2 ตำแหน่งในการวัดความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพลิต 44
4.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนและสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า 47
4.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตอะเซทิลีนแบล็ค 49
4.3 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์ 49
4.4 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน 50
4.5 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพลิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน ระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน 52

ภาพประกอบที่ หน้า

4.6 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว 54
4.7 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่าง อะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน..... 55
4.8 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว 59
4.9 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่าง อะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน..... 60
4.10 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว..... 61
4.11 โครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน 62
4.12 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่าง อะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน..... 63
4.13 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว..... 65
4.14 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่าง อะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน..... 66
4.15 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว..... 68
4.16 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่าง อะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน..... 68
4.17 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของสารเติมแต่งและพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก 71
4.18 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่เติมซิงค์สเตียเรทร่วมกับ ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 73
4.19 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง..... 74
4.20 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง..... 75
4.21 การดูดซับน้ำของของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง..... 76
4.22 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง 77

ภาพประกอบที่ หน้า

4.23 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง 78
4.24 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนและหลังการเติมสารเติมแต่ง
กับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว..... 79