การเตรียมแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วฐานแกรไฟต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

นางสาวเสาวลักษณ์ ผลาพิบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974 – 14 – 1810 – 8
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I22438631

PREPARATION OF GRAPHITE BASED BIPOLAR PLATE FOR PEM FUEL CELL

Miss Saowaluck Bhlapibul

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 – 14 – 1810 – 8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วฐานแกรไฟต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
โดย	นางสาวเสาวลักษณ์ ผลาพิบูลย์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

เสาวลักษณ์ ผลาพิบูลย์ : การเตรียมแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วฐานแกรไฟต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (PREPARATION OF GRAPHITE BASED BIPOLAR PLATE FOR PEM FUEL CELL) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. เก็จวลี พฤกษาทร, 97 หน้า. ISBN 974 – 14 – 1810 – 8

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดคอมโพสิตฐานแกรไฟต์ โดยใช้สารช่วยยึดเกาะประเภทพลาสติกเทอร์โมเซต ได้แก่ พอลิเอสเทอร์ (POE) ฟีนอลิกโมดิฟายส์แอลคิดส์เรซิน (PhA) เรซินผสม (POE และ 10% wt. PhA) และอีพอกซีเรซิน (EP) รวมทั้งศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และเชิงกล ผลการทดลองพบว่า PE สามารถรวมตัวกับผงแกรไฟต์ได้ในปริมาณที่มากกว่า PhA และเรซินผสม (อิ่มตัวที่ผงแกรไฟต์ร้อยละ 66โดยน้ำหนัก) รวมทั้งให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า (ค่าการนำไฟฟ้า 4.52 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ส่วนสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน (EP) จะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ในการศึกษาผลของสารเติมแต่ง (เส้นใยคาร์บอน (CF) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิงก์สเตียเรท (ZnSt)) พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรทจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานลดลงเล็กน้อย แต่จะช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานดีขึ้น ส่วนเส้นใยคาร์บอนจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในชิ้นงานที่ใช้ POE และ EP เป็นสารช่วยยึดเกาะ การนำส่วนผสมที่ได้จากกระบวนการเวทเลย์ (Wet – lay) ผสมลงในส่วนผสมของแกรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ POE เป็นสารช่วยยึดเกาะ สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลและลดค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน เมื่อนำแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง พบว่ายังให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ (34 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....เสาวลักษณ์ ผลาพิบูลย์.....

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

ปีการศึกษา.....2548.....

4772544723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD : GRAPHITE COMPOSITE / BIPOLAR PLATE / THERMOSETTING PLASTIC

SAOWALUCK BHLAPIBUL : PREPARATION OF GRAPHITE BASED BIPOLAR PLATE FOR PEM FUEL CELL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph. D. , 97 pp. ISBN 974 – 14 – 1810 – 8

This research was to study the preparation of graphite composite bipolar plate using liquid thermosetting plastic such as polyester resin (POE), phenolic modified alkyd resin (PhA), mixed resin (POE with 10% PhA) and epoxy resin (EP) as a binder. The morphology, physical, electrical and mechanical properties of the graphite composite were analyzed. The result showed that PE can combined with graphite powder (the 66% wt. saturated of graphite powder) better than PhA and mixed resin and gave higher electrical conductivity (4.52 S/cm). Epoxy resin can improve the mechanical property of composite plate. The investigation of additive effect was conducted by using carbon fiber (CF), TiO_2 and ZnSt. The results showed that TiO_2 and ZnSt slightly decreased the electrical conductivity and the water absorption of the graphite composite. Moreover, the mechanical property could be improved by TiO_2. The addition of carbon fiber can increase electrical and mechanical properties and water absorption of the composite using POE and EP as a binder. The mixing of Wet – lay mixture with graphite, carbon fiber and POE composite could increase the mechanical property and decrease the water absorption of composite. From the cell performance test, graphite composite bipolar plate gave the current density at 0.6 V (34 mA/cm^2) lower than the commercial bipolar plate.

Department.....Chemical Technology..... Student's signature Saowaluck Bhlapibul
Field of study ....Chemical Technology..... Advisor's signature K. Pruksathorn
Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทสยามเคมีคอล อินดัสทรีส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินเพื่อใช้ในงานวิจัย จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณนางสาวเอื้องดาว จันทร์ดร ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือระหว่างการดำเนินงานวิจัย จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนดำเนินงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้าย ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ญ
สารบัญรูป.....ฏ
บทที่
1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4
2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง.....4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....6
2.3 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว.....7
2.3.1 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน.....9
2.3.2 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นโลหะ.....9
2.3.3 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นคอมโพสิต.....10
2.4 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต.....13
2.4.1 แกรไฟต์.....13
2.4.2 พอลิเมอร์.....15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....22
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....26
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....26
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....26
3.3 การดำเนินการวิจัย.....27
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและสารเติมแต่ง.....27

บทที่ หน้า

3.3.2 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะ (Binder) 28
3.3.3 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของสารเติมแต่ง (Additive) 29
3.3.4 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาการเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงในชิ้นงาน 29
3.3.5 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ 31
3.3.6 การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) 32
3.3.7 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์คอมโพสิตตามมาตรฐาน ASTM C611 – 98 32
3.3.8 การหาความหนาแน่นของแกรไฟต์คอมโพสิต 33
3.3.9 การทดสอบการดูดซับน้ำตามมาตรฐาน ASTM D570 – 98 34
3.3.10 การทดสอบค่าความแข็งแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM D790 – 03 34
3.3.11 การทดสอบสมบัติความแข็งของชิ้นงาน ด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D2240 – 04 34
3.3.12 การทดสอบสมบัติของแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม 35
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 37
4.1 สมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและสารเติมแต่ง 37
4.2 การศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะ (Binder) 39
4.2.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา 39
4.2.2 สมบัติการนำไฟฟ้า 40
4.2.3 สมบัติเชิงกล 42
4.2.4 ค่าการดูดซึมน้ำ 45
4.2.5 ความหนาแน่น 46

บทที่ หน้า

4.3 การศึกษาผลของสารเติมแต่งพอลิเมอร์ (Polymer Additives).....47
4.3.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา 48
4.3.2 สมบัติการนำไฟฟ้า.....50
4.3.3 สมบัติเชิงกล 52
4.3.4 ค่าการดูดซึมน้ำ.....57
4.3.5 ความหนาแน่น 59
4.4 การศึกษาการเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงในชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต.....62
4.4.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา 63
4.4.2 สมบัติการนำไฟฟ้า.....64
4.4.3 สมบัติเชิงกล 65
4.4.4 ค่าการดูดซึมน้ำ.....67
4.4.5 ความหนาแน่น 68
4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานคอมโพสิตเมื่อใช้
อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ 69
4.5.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา 70
4.5.2 สมบัติการนำไฟฟ้า.....72
4.5.3 สมบัติเชิงกล 73
4.5.4 ค่าการดูดซึมน้ำ.....75
4.5.5 ความหนาแน่น 76
4.6 การขึ้นรูปแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตเพื่อใช้เป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว 77
4.7 การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นนำกระแสแบบ
สองขั้วชนิดแกรไฟต์คอมโพสิตจากงานวิจัย 81
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....84
5.1 สรุปผลการทดลอง.....84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....85
รายการอ้างอิง..... 86
ภาคผนวก 89
ภาคผนวก ก สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 90
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ 93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 97

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อมูลพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด....5

2.2 วัสดุเคลือบสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นโลหะ....10

2.3 วัสดุคาร์บอนคอมโพสิตสำหรับใช้ผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว....11

2.4 คุณลักษณะของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเมื่อใช้วัสดุที่แตกต่างกัน....12

2.5 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตแกรไฟต์พอลิเมอร์คอมโพสิตสำหรับแผ่นนำกระแส....16

3.1 สัดส่วนการผสมเพื่อศึกษาผลของเส้นใยคาร์บอน....29

3.2 สัดส่วนการผสมเพื่อศึกษาการเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงในชิ้นงาน....30

3.3 สัดส่วนการผสมผง WL 73 ลงในชิ้นงานต่างๆ....31

4.1 ความหนาแน่นของผงแกรไฟต์และสารเติมแต่ง....37

4.2 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ....75

4.3 ชนิดและสมบัติของแกรไฟต์คอมโพสิตเพื่อพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสม
ในการขึ้นรูป....77

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้จากงานวิจัย
(7.3CF&WL73) กับแผ่นพอลิเมอร์คอมโพสิตจากงานวิจัยของเอื้องดาว
และ Cho และคณะ....80

ก1 สมบัติของพลาสติกเทอร์โมเซตที่ใช้ในงานวิจัย....92

ข1 ค่าความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์
เป็นสารยึดเกาะ ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 63 โดยน้ำหนัก....93

ข2 น้ำหนักแห้งและขนาดของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารยึดเกาะ
ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 63 โดยน้ำหนัก....95

ข3 น้ำหนักแห้งและน้ำหนักเปียกของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะ
มีปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 63 โดยน้ำหนัก....96

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แผนภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 4

2.2 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (PEM fuel cell stack) 7

2.3 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วจากวัสดุชนิดต่างๆ....8

2.4 โครงสร้างของแกรไฟต์....14

2.5 การจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต 17

2.6 โครงสร้างแบบเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซิน....18

2.7 เครื่องอัดแบบขึ้นรูป 22

3.1 ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปเพื่อศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะ....28

3.2 กระบวนการผสมที่ประยุกต์จากกระบวนการเวทเลย์....30

3.3 การวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคสี่จุด ตามมาตรฐาน ASTM C611 – 98 33

3.4 ตำแหน่งในการวัดค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ของชิ้นงาน....34

4.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็น
เป็นคาร์บอนและสารเติมแต่ง....38

4.2 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ปริมาณผงแกรไฟต์
ผงแกรไฟต์ร้อยละ 63 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะที่แตกต่างกันที่กำลัง
ขยาย 1,000 เท่า....40

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและร้อยละของผงแกรไฟต์
โดยน้ำหนักเมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ 42

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนัก
เมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ 44

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของผงแกรไฟต์โดย
โดยน้ำหนักเมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ 45

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนัก
เมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ 46

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและ
ร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนักเมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ....47

4.8 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต
เมื่อศึกษาผลของเส้นใยคาร์บอน ที่กำลังขยาย 200 เท่า....49

รูปที่ หน้า

4.9 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....49
4.10 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของซิงก์สเตียเรท ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า 50
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก 51
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและปริมาณของสารเติมแต่งเมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ ที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก 52
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก.....53
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก 54
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66โดยน้ำหนัก 55
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก 56
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและร้อยละของเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 57
4.18 โครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน 57
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก.....59

รูปที่ หน้า

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต และร้อยละของเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 60

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและ ปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ และมีปริมาณ คาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 61

4.22 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของการเติมส่วนผสมเวทเลย์73 ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ด้านซ้ายมือ) เปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนเติมผงเวทเลย์ (ด้านขวามือ) 64

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและการเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 ลงในชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานก่อนเติมส่วน ผสมเวทเลย์73 65

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและการเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 ลงใน ชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต ก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์73 66

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีและการเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 ลงในชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงาน แกรไฟต์คอมโพสิตก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 67

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซึมน้ำและการเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 ลงใน ชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต ก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 68

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและการเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 ลงใน ชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต ก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 69

4.28 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานคอมโพสิตเมื่อใช้ อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า 71

4.29 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซี เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ 73

4.30 ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็น สารช่วยยึดเกาะ 74

รูปที่ หน้า

4.31 ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ 75
4.32 ความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ 76
4.33 แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้จากงานวิจัยและแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์.....78
4.34 การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย (7.3CF & WL73) กับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว 80
4.35 กราฟโพลาไรเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้งานวิจัยเปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเชิงพาณิชย์ของ Electrochem Inc.....81
4.36 Niquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้งานวิจัยที่ความต่างศักย์ 0.6โวลต์ ที่ค่าโมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์ต่างๆ.....83
4.37 Niquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเชิงพาณิชย์ของ Electrochem Inc. ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ และใช้โมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์ 40 ปอนด์แรง – นิ้ว 83