

การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน



นางสาวสรานีย์ ชีมประเสริฐ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF BIPOLAR PLATE FROM CARBON COMPOSITE CONTAINING
POLYANILINE



Ms. Saranee Simprasert

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากคาร์บอน
คอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน

โดย

นางสาวสรานีย์ ชุ่มประเสริฐ

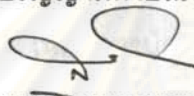
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

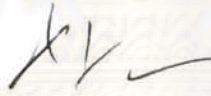
รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาท

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

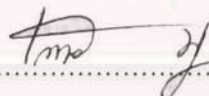


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรคานต์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาท)



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



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย)

สรณีย์ ชิมประเสริฐ : การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน. (PREPARATION OF BIPOLAR PLATE FROM CARBON COMPOSITE CONTAINING POLYANILINE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เก็จวดี พุกษاطر, 103 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากคาร์บอนคอมพอสิตผสมพอลิอะนิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้คาร์บอน 3 ชนิด ได้แก่ RGN, BDH, ผงแปร่งถ่าน รวมทั้งศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกล ผลการทดลอง พบว่า ผงแปร่งถ่านและ BDH ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน (ค่าการนำไฟฟ้า 14.8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) และมากกว่า RGN เมื่อปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าโดยนำผงแปร่งถ่านไปทำการปรับสภาพด้วยกรด พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในการศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน พบว่าพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์จะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง วิธีในการเตรียมแผ่นคอมพอสิตโดยทำการผสมผงแปร่งถ่านลงไปในช่วงตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์เพื่อให้ผงแปร่งถ่านและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น จะช่วยปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้า แต่สมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลทำโดยเติมสารเติมแต่ง คือ เส้นใยคาร์บอนและท่อคาร์บอนนาโน พบว่า เส้นใยคาร์บอนและท่อคาร์บอนนาโนช่วยปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น เมื่อนำแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตมาใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง โดยส่วนผสมของแผ่นคอมพอสิต ประกอบด้วย พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผงแปร่งถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เมื่อนำแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 219 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ แต่อย่างน้อยกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วทางการค้าชนิดแกรไฟต์ (383 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....สรณีย์ ชิมประเสริฐ.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา2552.....

5072499823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: bipolar plate /carbon composite /polyaniline

SARANEE SIMPRASERT: PREPARATION OF BIPOLAR PLATE FROM CARBON COMPOSITE CONTAINING POLYANILINE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D., 103 pp.

This research was to study the preparation of bipolar plate from carbon composite containing conductive polyaniline. To increase the electrical conductivity of composite plate, carbon such as RGN, BDH and carbon brush (CB) was used to study the electrical conductivity and mechanical properties. The result showed that CB and BDH gave similar electrical conductivity (14.8 S/cm) and higher than RGN. It was founded that the electrical conductivity could be improved by treated CB with acid. The investigation of added polyaniline and polyaniline nanofiber showed that polyaniline nanofiber increased the electrical conductivity but decreased mechanical properties. Carbon composite was prepared by adding treated CB during the synthesis of polyaniline nanofiber for homogeneous mixture. This method can be improve electrical conductivity but decrease mechanical properties. However, the research indicated that the mechanical properties could be improved by additives such as carbon fiber and carbon nanotubes. The result showed that the additives could be increased electrical conductivity and mechanical properties. From the cell performance test, the mixture of composite plate was composed of polyaniline nanofiber 7 %wt., carbon fiber 20 %wt. and treated CB 60 %wt. The carbon composite bipolar plate gave the current density of 219 mA/cm² at 0.6 V but it was lower than the commercial graphite bipolar plate (383 mA/cm²).

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

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

Academic Year :.....2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญธรรม และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรรณคลชัย ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาด เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการ พัฒนาศึกษาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ที่ได้มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดการทำกรวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทคโนโลยีไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	5
2.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	6
2.4 วัสดุคอมพอสิต.....	15
2.5 วัสดุที่นำมาสร้างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	16
2.5.1 ผงคาร์บอน.....	16
2.5.2 พอลิเมอร์.....	18
2.5.3 สารเติมแต่ง.....	21
2.5.4 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	22
2.6 เทคโนโลยีการขึ้นรูป.....	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	31
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	32

บทที่

หน้า

3.3.1 การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนโดยวิธีเคมีแบบดั้งเดิม.....	32
3.3.2 การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์.....	33
3.3.3 การปรับสภาพของคาร์บอน.....	33
3.3.4 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของชนิดคาร์บอนและ อัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์บอน.....	33
3.3.5 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน.....	34
3.3.5.1 การเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีน ด้วยวิธีการเติม.....	35
3.3.5.2 การเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีน ด้วยวิธีการผสม.....	36
3.3.6 การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) ของคาร์บอนคอมพอสิต โดยเทคนิค four point probe.....	37
3.3.7 การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane).....	38
3.3.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D570-98.....	40
3.3.9 การทดสอบค่าความแข็งแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM D790-03.....	40
3.3.10 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงของชิ้นงาน ด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งแรง โรมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D2240-04.....	40
3.3.11 การทดสอบสมบัติของแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนเมื่อ ใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	41
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	43
4.1 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณคาร์บอนที่เหมาะสม.....	43
4.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane).....	43
4.1.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane).....	45
4.1.3 สมบัติเชิงกล.....	46
4.1.4 ค่าการดูดซึมน้ำ.....	48
4.1.5 ความหนาแน่น.....	49
4.2 การศึกษาผลของการปรับสภาพคาร์บอน.....	50
4.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane).....	51
4.2.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane).....	52

บทที่

หน้า

4.2.3 สมบัติเชิงกล.....	53
4.2.4 ค่าการดูดซึมน้ำ.....	55
4.2.5 ความหนาแน่น.....	56
4.3 การศึกษาสมบัติของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่เตรียมได้...	57
4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	57
4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM).....	59
4.3.3 การวัดค่าการนำไฟฟ้า.....	60
4.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA).....	60
4.4 การศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน.....	62
4.4.1 การเตรียมแผ่นคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน.....	63
4.4.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane).....	63
4.4.1.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane).....	64
4.4.1.3 สมบัติเชิงกล.....	64
4.4.1.4 ค่าการดูดซึมน้ำ.....	66
4.4.1.5 ความหนาแน่น.....	67
4.4.2 การเตรียมแผ่นคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์.....	68
4.4.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane).....	68
4.4.2.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane).....	69
4.4.2.3 สมบัติเชิงกล.....	70
4.4.2.4 ค่าการดูดซึมน้ำ.....	71
4.4.2.5 ความหนาแน่น.....	72
4.5 การศึกษาผลของสารเติมแต่ง.....	73
4.5.1 เส้นใยคาร์บอน.....	74
4.5.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) และแนวทะลุผ่าน (through-plane).....	74
4.5.1.2 สมบัติเชิงกล.....	75

บทที่	หน้า
4.5.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำ.....	77
4.5.1.4 ความหนาแน่น.....	78
4.5.2 ท่อคาร์บอนนาโน.....	79
4.5.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) และในแนวทะลุผ่าน (through-plane).....	79
4.5.2.2 สมบัติเชิงกล.....	80
4.5.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำ.....	82
4.5.2.4 ความหนาแน่น.....	82
4.6 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัย.....	85
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	94
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น bipolar plate.....	13
2.2	ชนิดของคาร์บอนคอมพอสิตที่นำมาใช้สร้างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.	19
2.3	สมบัติของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	23
3.1	สัดส่วนการผสมเพื่อศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน.....	35
4.1	ตำแหน่งการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่สำคัญซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิอะนิลีน.....	57
4.2	สมบัติของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมในสัดส่วนต่างๆ.....	84
ก1	สมบัติของผงคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัย.....	94
ข1	ค่าความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซิน เป็นสารยึดเกาะ ปริมาณผงแปรงถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก.....	97
ข2	น้ำหนักแห้งและน้ำหนักเปียกของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ มีปริมาณผงแปรงถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก.....	101
ข3	น้ำหนักแห้งและขนาดของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารยึดเกาะ ปริมาณผงแปรงถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก.....	102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (แสดงในรูปของคาร์บอน) จากยานพาหนะที่ใช้การสันดาปภายในด้วยน้ำมันเบนซินเปรียบเทียบกับยานพาหนะที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงาน.....	4
2.2 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....	5
2.3 กลไกการทำงานของ PEMFC.....	6
2.4 หอเซลล์เชื้อเพลิง (stack component of fuel cell).....	7
2.5 การต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบอนุกรมโดยใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	8
2.6 ทิศทางการไหลของแก๊สในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	9
2.7 รูปแบบทิศทางการไหลของแก๊สในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	10
2.8 ร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนประกอบทั้งหมดในหอเซลล์เชื้อเพลิง.....	12
2.9 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากวัสดุชนิดต่างๆ.....	14
2.10 โครงสร้างผลึกของคาร์บอนอสัณฐาน เพชร แกรไฟต์ และโบรมีนสเตอร์ฟูลเลอร์รีน.....	16
2.11 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์จากการมองในทุกทิศทาง.....	17
2.12 พอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	22
2.13 โครงสร้างของพอลิอะนิลีน.....	24
2.14 โครงสร้างของพอลิอะนิลีน emeraldine salt และ emeraldine base.....	25
2.15 ส่วนประกอบของเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์.....	26
2.16 ส่วนประกอบของเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีฉีด.....	27
3.1 ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปเพื่อศึกษาผลของชนิดคาร์บอนและอัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์บอน.....	34
3.2 ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปเพื่อศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการเติม.....	36
3.3 ส่วนประกอบของการวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ Four-Point Probe.....	37
3.4 การวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค four point probe.....	38
3.5 การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน.....	39
3.6 ตำแหน่งในการวัดค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ของชิ้นงาน.....	40

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของผงคาร์บอน โดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	45
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของผง คาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	46
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของผงคาร์บอนโดย น้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	47
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของผงคาร์บอนโดย น้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	48
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	49
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละ ของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	50
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของผงคาร์บอน โดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแปร่งถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับ สภาพ (t-CB).....	52
4.8 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผงแปร่งถ่าน.....	52
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของผง คาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแปร่งถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการ ปรับสภาพ (t-CB).....	53
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของผงคาร์บอนโดย น้ำหนักเมื่อใช้ผงแปร่งถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB).....	54
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของผงคาร์บอนโดย น้ำหนักเมื่อใช้ผงแปร่งถ่านที่ไม่ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB).....	54
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้ผงแปร่งถ่านที่ไม่ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB).....	55

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชั้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแปรงถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ(t-CB).....	56
4.14 FTIR spectra ของพอลิอะนิลีนจากงานวิจัยของ He.....	58
4.15 FTIR spectra ของพอลิอะนิลีนที่สังเคราะห์ได้.....	58
4.16 FTIR spectra ของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่สังเคราะห์ได้.....	58
4.17 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์.....	59
4.18 TGA thermograms ของพอลิอะนิลีน.....	61
4.19 TGA thermograms ของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์.....	61
4.20 TGA thermograms ของพอลิอะนิลีนจากงานวิจัยของ Chen และคณะ.....	62
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก.....	63
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก.....	64
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดของชั้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก.....	65
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดุมโรมิเตอร์และร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก.....	66
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก...	67
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชั้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก.....	67
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก.....	68
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก.....	69

ภาพประกอบ	หน้า
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก.....	70
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดิวโมมิเตอร์และร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก.....	71
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก.....	72
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก.....	73
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์.....	75
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์.....	76
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดิวโมมิเตอร์ชนิดบีและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์.....	77
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์.....	78
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์.....	79
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและร้อยละของคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์.....	80

ภาพประกอบ	หน้า
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการ สังเคราะห์.....	81
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งคูโรมิเตอร์และร้อยละของคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการ สังเคราะห์.....	81
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของคาร์บอนนาโนทิวบ์โดย น้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการ สังเคราะห์.....	82
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและร้อยละของคาร์บอนนาโนทิวบ์โดย น้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการ สังเคราะห์.....	83
4.43 กราฟโพลาริเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบ สองขั้วที่ได้จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำ กระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์.....	86
4.44 Nyquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ ได้จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้า แบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ที่ค่าโมเมนต์การหมุน ประกอบเซลล์ 40 ปอนด์แรง-นิ้ว.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันและถ่านหินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดซึ่งเมื่อใช้แล้วก็จะหมดไป ดังนั้นเมื่อความต้องการใช้ทรัพยากรธรรมชาติมีมากขึ้น ส่งผลให้ราคาน้ำมันเพิ่มขึ้นตาม จึงมีความพยายามเสาะแสวงหาแหล่งพลังงานรูปแบบใหม่ที่มีปริมาณมากพอที่จะใช้ทดแทนน้ำมันและถ่านหินได้ หรืออุปกรณ์การแปลงพลังงานเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันก็มีความสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งอุปกรณ์การแปลงพลังงานหนึ่งที่นำเสนอใจคือ เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายประเภท โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells- PEMFC) เป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยจุดเด่นคือ มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณร้อยละ 40-50 สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 50-250 กิโลวัตต์ อีกทั้งเป็นระบบที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่น เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์, เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง เป็นต้น [1] จึงทำให้การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ PEMFC ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วย ขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน และแผ่นนำกระแสไฟฟ้าพร้อมช่องทางไหลของแก๊ส เมื่อนำแต่ละเซลล์มาต่อกันจะต้องใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาคั่นระหว่างเซลล์ เนื่องจากแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่ง นอกจากนี้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าเป็นส่วนที่กำหนดปริมาตร น้ำหนัก และราคาของเซลล์เชื้อเพลิง (แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วคิดเป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนักจากน้ำหนักทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิง) [2] ดังนั้นจึงมีการศึกษาวัสดุที่เหมาะสมทั้งสมบัติการนำไฟฟ้าและทางกายภาพ และมีราคาถูกเพื่อใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้า การผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วต้องใช้วัสดุที่มีความทนทานต่อภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป [3]

วัสดุที่นิยมใช้ผลิตเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว คือ แกรไฟต์ ทั้งในรูปแบบของแผ่นแกรไฟต์ชนิดไม่มีรูพรุนและแผ่นแกรไฟต์คอมพอสิต เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านการนำไฟฟ้า และการทนทานการกัดกร่อนที่ดีมากเหมาะสมกับการใช้งาน แต่ข้อเสียของแกรไฟต์ก็คือ มีน้ำหนักสูง และยากต่อการขึ้นรูปเนื่องจากแข็งและเปราะทำให้มีความยากในขั้นตอนการผลิต นอกจากนี้ ยังมีราคาแพง [4] ส่วนแกรไฟต์คอมพอสิตจะทำให้สมบัติการนำไฟฟาลดลง เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตที่ใช้คือพอลิเมอร์และตัวประสาน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นถ้ามีการเติมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าผสมกับแกรไฟต์คอมพอสิตน่าจะสามารเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าได้ โดยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ซ้ำๆ กัน และมีอะตอมเรียงต่อกันด้วยพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว จึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่และนำไฟฟ้าได้ ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเช่น พอลิอะนิลีน พอลิไพร์โรล พอลิไทโอเฟน พอลิอะเซทิลีน เป็นต้น พอลิอะนิลีนนับเป็นพอลิเมอร์ที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เพราะราคาถูก ทนต่อสภาพแวดล้อม และสังเคราะห์ได้ง่าย [5]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมโดยการผสมแกรไฟต์ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดพอลิอะนิลีน เพื่อช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า และสารเติมแต่งในการยึดเกาะกันของผงแกรไฟต์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและลดต้นทุนในการผลิตในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน
2. ศึกษาผลขององค์ประกอบในแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนต่อสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกล

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง
2. เป็นแนวทางในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงภายในประเทศ

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ศึกษาวิธีการและวางแผนการทดลอง เพื่อเป็นแนวทางในการทำการทดลองที่มีขั้นตอนเหมาะสมและไม่เกิดอันตราย
2. เตรียมสารเคมี
3. สังเคราะห์พอลิอะนิลีน
4. วิเคราะห์หมู่โครงสร้างของพอลิอะนิลีนด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) และวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA)
5. หาสารช่วยยึดเกาะ (binder) ที่เหมาะสม
6. ทำการผสมพอลิอะนิลีน ผงแกรไฟต์และสารช่วยยึดเกาะในอัตราส่วนต่างๆกัน และอาจมีการเติมสารที่มีส่วนช่วยในเรื่องของค่าการนำไฟฟ้า แล้วนำไปอัดขึ้นรูปโดยใช้สภาวะคงที่ คือ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยศึกษาตัวแปรดังนี้
 - ชนิดของคาร์บอน
 - อัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์บอนและเรซิน
 - ปริมาณการเติมพอลิอะนิลีน
 - วิธีการสังเคราะห์พอลิอะนิลีน
 - วิธีการเตรียมผงคาร์บอนคอมพอสิต (ลำดับขั้นในการผสมพอลิอะนิลีน) ก่อนการอัดขึ้นรูป
 - สารเติมแต่ง (เส้นใยคาร์บอน)
7. นำชิ้นงานที่เตรียมได้ ไปวิเคราะห์ค่าการนำกระแสไฟฟ้า และสมบัติเชิงกล
8. ทดสอบสมรรถนะการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง
9. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง
10. เขียนวิทยานิพนธ์

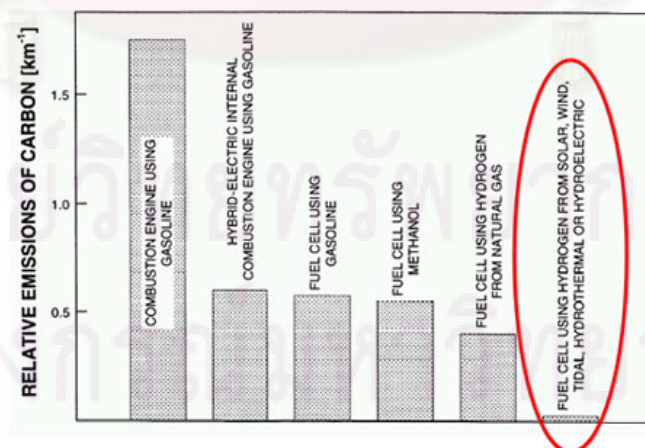
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง [6]

ความก้าวหน้าของวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน ทำให้เกิดเทคโนโลยีที่สามารถดึงเอาแหล่งพลังงานใหม่หลายแหล่งมาใช้ ไม่ว่าจะเป็นแสงอาทิตย์ ไฮโดรเจน นิวเคลียร์ เชื้อเพลิงจากชีวมวล เช่น เอทานอล ไบโอดีเซล เป็นต้น ในจำนวนนี้ไฮโดรเจน เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้งานอย่างจริงจังโดยใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง ขณะนี้หน่วยงานทั่วโลก ทั้งภาครัฐและภาคเอกชนได้ให้ความสนใจและร่วมลงทุนในการเตรียมพร้อมสำหรับการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงเข้าสู่ตลาดพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดและไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงนับได้ว่าเทคโนโลยีนี้อาจเข้ามามีบทบาทอย่างมากในอนาคต ต่อการพัฒนาพลังงานรูปแบบใหม่ขึ้นใช้เองในประเทศ เพื่อวัตถุประสงค์ ดังนี้

- ลดปริมาณการนำเข้าและใช้เชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันและถ่านหิน
- ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน
- ลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาพลังงานที่ต้องนำเข้า
- ลดปัญหามลพิษทางอากาศ น้ำ รวมถึง ปรากฏการณ์เรือนกระจก (green house effect) เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม (รูปที่ 2.1)

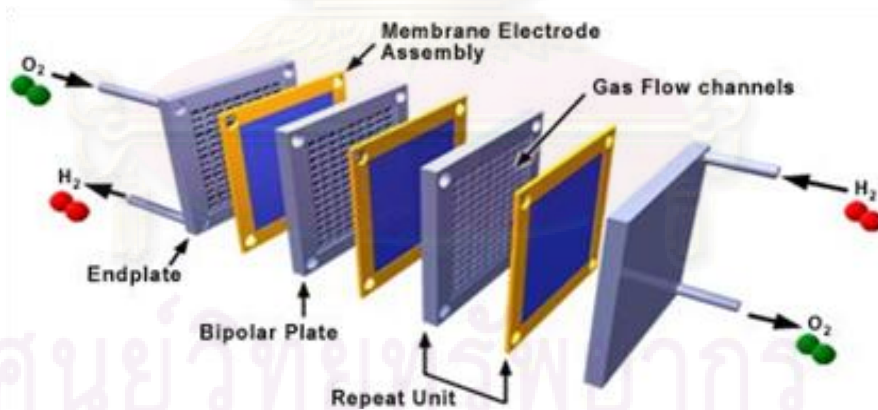


รูปที่ 2.1 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (แสดงในรูปของคาร์บอน) จากยานพาหนะที่ใช้การสันดาปภายในด้วยน้ำมันเบนซินเปรียบเทียบกับยานพาหนะที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงาน [7]

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) [8]

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งต้องมีการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง แต่มีภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำคือ อยู่ในช่วง 60-100 องศาเซลเซียส, 1-2 บรรยากาศ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วย (รูปที่ 2.2) พอลิเมอร์ของแข็ง (ซัลโฟเนตพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลิน) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมเกาะอยู่บนน้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกกำจัดออกจากเซลล์มากับแก๊สทางด้านแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนไฮโดรเจน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ใช้ต้องทำให้มีความชื้น เพราะกระบวนการนำไอออนของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนจะเกิดขึ้นไม่ได้หากเยื่อแผ่นไม่มีน้ำ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ เพราะจะมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม



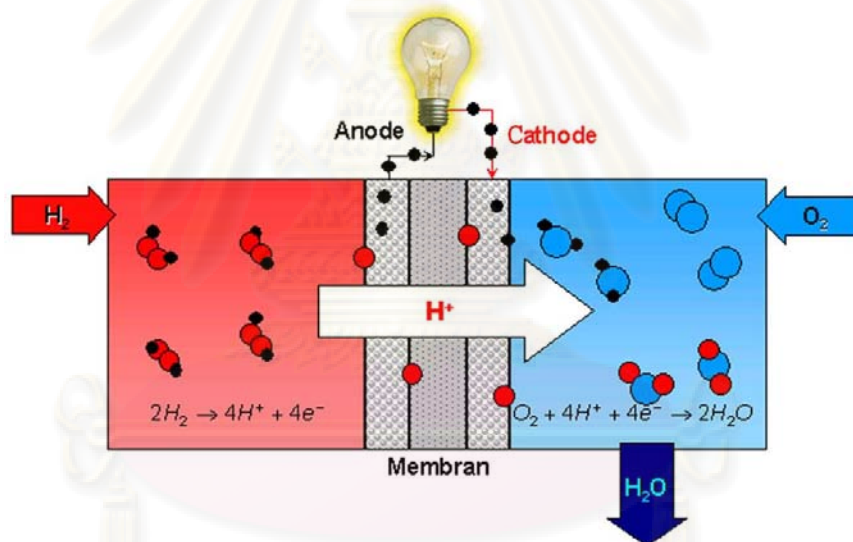
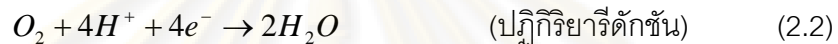
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [9]

PEMFC ประกอบด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วน ได้แก่ อิเล็กโทรด 1 คู่ (แคโทดและแอโนด) เยื่อแผ่น และตัวเร่งปฏิกิริยา (แพลทินัม) เชื้อเพลิงซึ่งถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยแก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะ

เกิดขึ้นโดยมีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.3 จากนั้นโปรตอน อิเล็กตรอน และความร้อน จะถูกผลิตออกมาตามสมการ 2.1



โปรตอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการนำโปรตอนสูง (high proton conductivity) แต่ไม่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ (electron barrier) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยัง ขั้วแคโทด เพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามาขั้วดังกล่าว ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจากการที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้นำเป็นผลิตภัณฑ์ตามสมการ 2.2

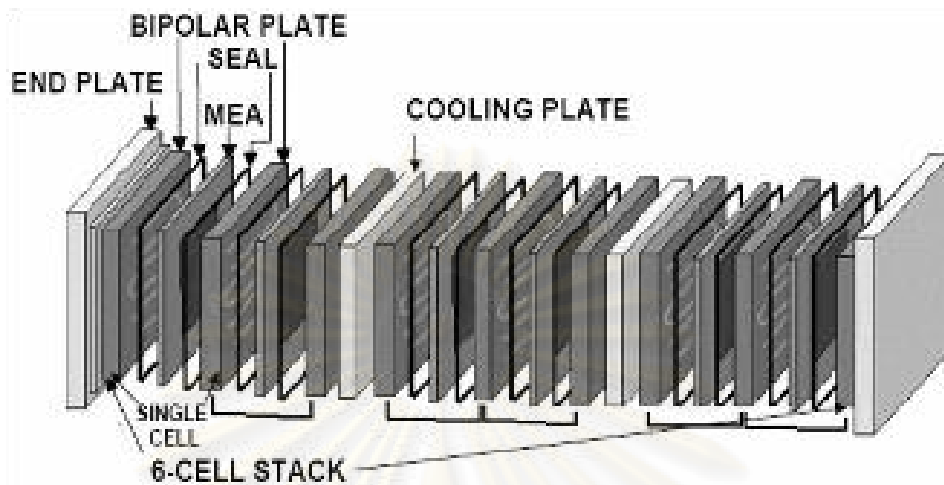


รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของ PEMFC [6]

2.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) [10-17]

จากในอดีตพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์จะมีค่าความต่างศักย์ค่อนข้างต่ำ (~ 0.7 โวลต์) ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่ต่ำเกินไปนี้ ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ดังนั้นจึงได้มีผู้ออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงใหม่โดยการนำเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆ เซลล์มาต่อกันแบบอนุกรม ลักษณะของการนำเอาเซลล์มาต่อกันนี้เรียกว่า “ห่อเซลล์เชื้อเพลิง” หรือ Fuel cell stack

วิธีการต่อแบบง่าย ๆ คือการเชื่อมขบขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดของเซลล์ถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2.4

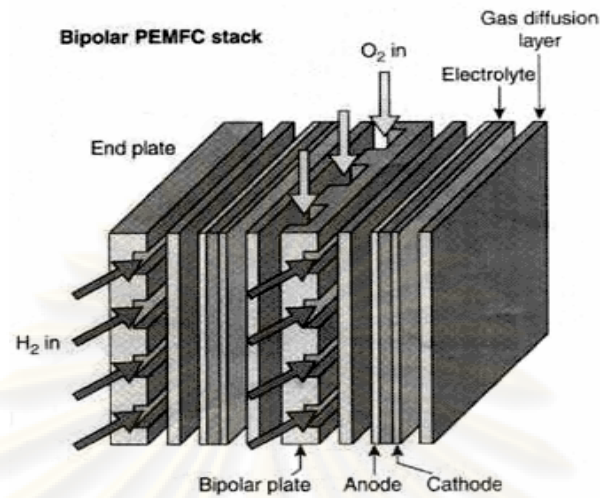


รูปที่ 2.4 หอเซลล์เชื้อเพลิง (stack component of fuel cell) [4]

ปัญหาของการต่อเซลล์เชื้อเพลิงที่ขอบ คือการที่อิเล็กโตรรอนต้องไหลข้ามตลอดผิวหน้าของอิเล็กโตรดไปยังจุดเชื่อมต่อที่ขอบด้านบนของอิเล็กโตรด ถึงแม้ว่าอิเล็กโตรดจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูง แต่เนื่องจากค่าความต่างศักย์ของเซลล์หนึ่งเซลล์มีค่าเพียงแค่ 0.7 โวลต์ ดังนั้นการตกลงของค่าความต่างศักย์เพียงเล็กน้อยก็จะมีผลกระทบสูง การต่อเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้จุดเชื่อมต่อที่ขอบเหมาะสำหรับกรณีที่ขั้วอิเล็กโตรดมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงหรือที่ค่าการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไม่สูงเกินไป [10]

วิธีการต่อเซลล์เชื้อเพลิงอีกแบบหนึ่ง คือการใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (bipolar plate) มาทำหน้าที่ดึงกระแสออกโดยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนี้จะวางคั่นระหว่างขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งกับขั้วแอโนดของเซลล์ที่อยู่ถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนอกจากจะมีหน้าที่หลัก คือนำกระแสไฟฟ้าแล้ว ยังมีหน้าที่อย่างอื่นที่สำคัญอีก คือ

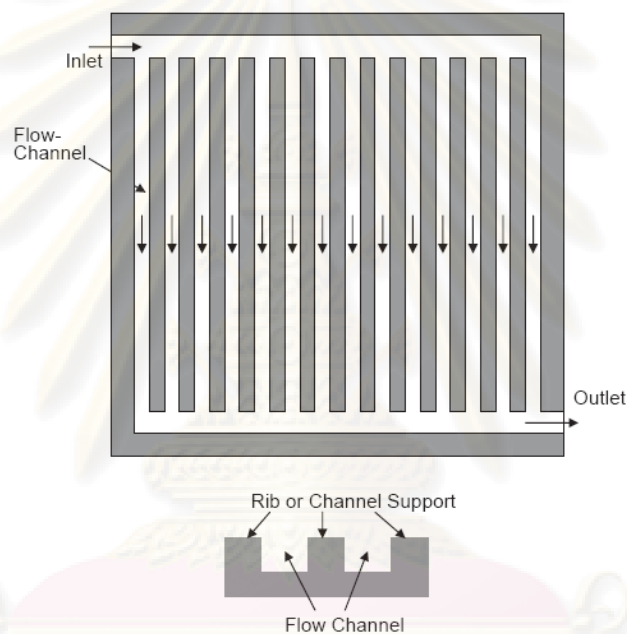
- เป็นช่องป้อนแก๊สออกซิเจนให้ขั้วแคโทด และป้อนไฮโดรเจนให้แก่ขั้วแอโนด
- กระจายแก๊สหรืออากาศให้ทั่วถึงตลอดเซลล์
- ระบายความร้อนออกจากเซลล์
- นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่ง
- ป้องกันการรั่วของแก๊สและสารหล่อเย็น



รูปที่ 2.5 การต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบอนุกรมโดยใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [11]

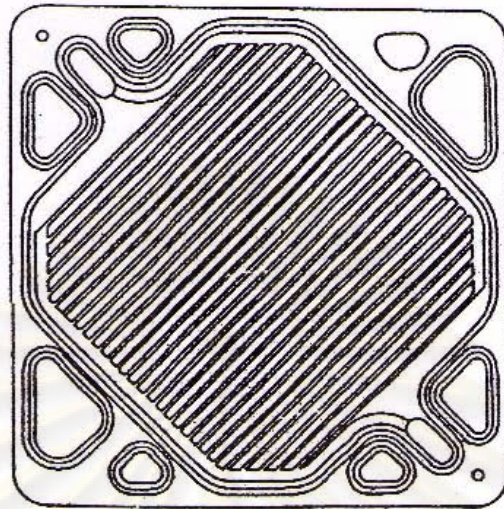
จากการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อเซลล์แบบใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วกับการต่อเซลล์ที่ขบ พบว่าการไหลออกของกระแสจากเซลล์หนึ่งและไหลไปในอีกเซลล์หนึ่งของการต่อแบบใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยกระแสสามารถไหลเข้า-ออกได้ตลอดพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดแทนที่จะเป็นเฉพาะที่ขบ ในขณะที่เดียวกันอิเล็กโทรดยังได้รับการประคับประคองจากแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ทำให้มีความแข็งแรงและทนทานมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ไม่ใช่จะกระทำได้ง่ายๆ เพราะหากต้องการให้มีการดึงกระแสออกหรือเข้าเซลล์ได้ดี จุดสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ควรมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะมากได้ แต่หากจุดสัมผัสมีค่ามากเกินไป การกระจายแก๊สให้สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดตลอดพื้นที่หน้าตัดมักเกิดได้ไม่ดี และในกรณีที่จุดสัมผัสมีขนาดเล็ก การออกแบบจะต้องให้มีจุดสัมผัสมากที่สุดหรือตำแหน่งจุดสัมผัสควรมีค่ามาก ซึ่งจะส่งผลให้การออกแบบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วกระทำได้ยากและราคาในการผลิตสูง ในทางอุดมคติแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ควรมีความบางให้มากที่สุด เพื่อลดค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าและทำให้ห่อเซลล์เชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก แต่การออกแบบให้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วบางเกินไปช่องทางไหลของแก๊สจะแคบ ส่งผลให้การนำแก๊สเข้าเซลล์ทำได้ยาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้อากาศแทนออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ขั้วแคโทด ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำอากาศที่ไหลเวียนต้องทำการระเหยน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไหลออกจากเซลล์ ในบางครั้งแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วยังทำหน้าที่ช่วยดึงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าออกอีก โดยการออกแบบให้มีช่องทางไหลเพิ่มอีก 1 ช่องทาง สำหรับให้ของไหล

หล่อเย็นไหลผ่าน โดยรูปแบบของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ที่นิยมทำ คือแบบแผ่นบาง พร้อมทั้งมีการกัดให้เป็นร่องเล็กๆ ให้แก๊สไหลผ่าน หรืออาจเรียกแผ่นนี้ว่า แผ่นช่องทางไหล (flow field plate) ดังแสดงในรูป 2.6 รูปร่างของช่องที่เจาะมีลักษณะซับซ้อนมากกว่าที่จะเป็นช่องทางไหลตรงๆ ช่องทางไหลส่วนใหญ่มีลักษณะที่วกไปวนมา โดยแก๊สจะถูกบ่อน้ำที่มุมหนึ่งของเซลล์ และไหลไปทั่วตลอดพื้นผิวอิเล็กโทรด และไหลออกที่มุมตรงกันข้ามก่อนที่จะไหลไปยังเซลล์ถัดไป [12] ดังแสดงในรูป 2.7

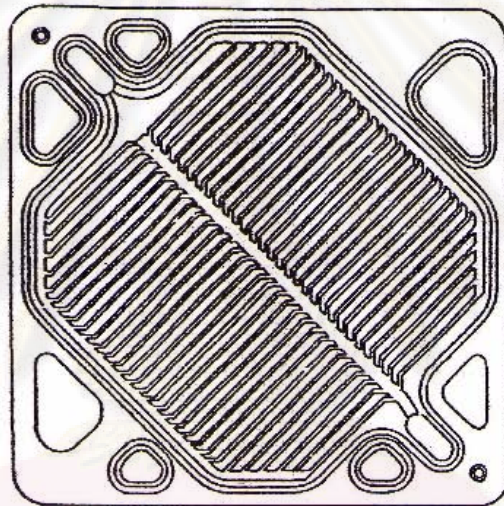


รูปที่ 2.6 ทิศทางการไหลของแก๊สในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [9]

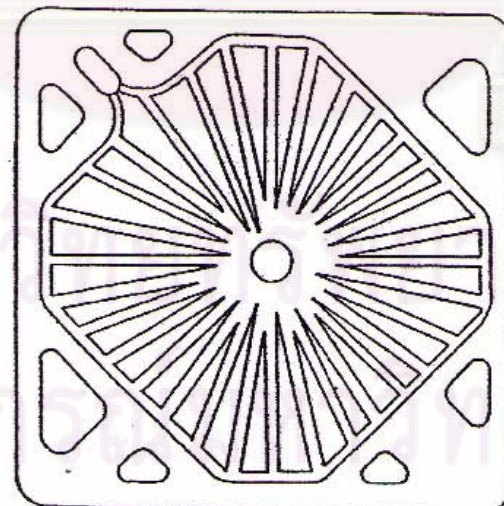
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 2.7 รูปแบบทิศทางการไหลของแก๊สในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว

ก), ข), และ ค) ทิศทางการไหลแบบตรงและแบบขนาน [2]

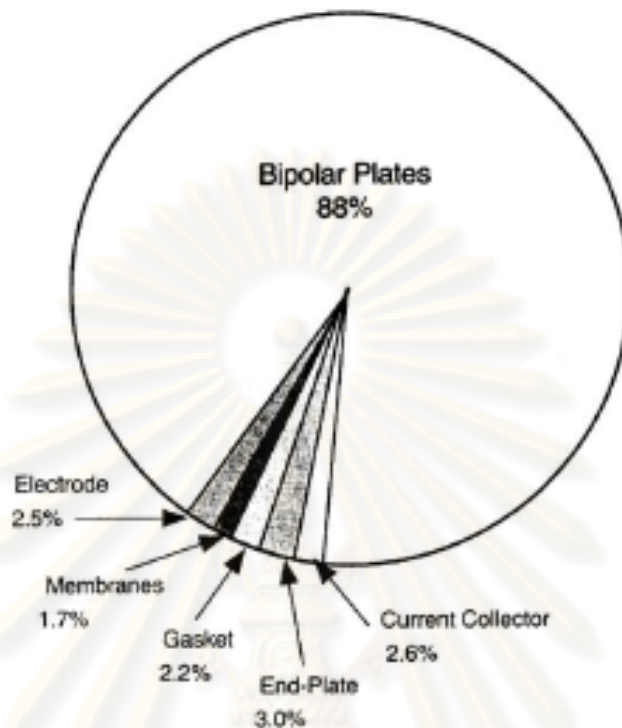
จากการพิจารณาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว นับว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญมากโดย แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ดีจะต้องมีสมบัติโดยทั่วไป คือ

In-plane electrical conductivity	>100 S/cm
Thermal conductivity	>10 W(mK) ⁻¹
Gas permeability	<10 ⁻⁴ cm ³ cm ⁻² s ⁻¹
Flexural Strength	> 59 MPa
Tensile Strength	> 41 MPa
Corrosion resistance (pH<4)	< 16x10 ⁻⁴ μAm ⁻²

โดยสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาสร้าง และกระบวนการหรือวิธีการในการสร้าง [13]

วัสดุที่นิยมนำมาสร้างเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (bipolar plate) มากที่สุด คือ แกรไฟต์ (graphite) รองลงมา คือ โลหะดัดแสดงในตารางที่ 2.3 เนื่องจากแกรไฟต์ มีสมบัติโดดเด่นในด้านการนำไฟฟ้า และทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก ส่วนโลหะนั้นถึงแม้จะมีความแข็งแรง (strength) และความแกร่ง (toughness) สูง แต่ก็มักจะมีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากกรดที่เกิดขึ้นในระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จึงไม่ค่อยได้รับความนิยม อย่างไรก็ตาม การใช้งาน bipolar plate ที่ทำด้วยแกรไฟต์ในปัจจุบันนั้นประสบปัญหาที่สำคัญ คือ เรื่องน้ำหนักและราคาของ bipolar plate [14]

- น้ำหนักของ bipolar plate เนื่องจากแกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมาก ดังนั้น bipolar plate จึงเป็นส่วนประกอบที่มีร้อยละของน้ำหนักสูงที่สุดจากส่วนประกอบทั้งหมดในห่อเซลล์เชื้อเพลิง โดยพบว่า bipolar plate มีน้ำหนักสูงถึงประมาณร้อยละ 88 โดยน้ำหนักของส่วนประกอบทั้งหมดในห่อเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงมาก [15]



รูปที่ 2.8 ร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนประกอบทั้งหมดในห่อเซลล์เชื้อเพลิง [9]

- ราคาของ bipolar plate ประกอบด้วยราคาของแกรไฟต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาแพง และราคาของกระบวนการ เช่น การสร้างหรือขึ้นรูป bipolar plate และกระบวนการเซาะร่อง เป็นต้น ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูง จากการประมาณพบว่าราคาของแกรไฟต์ที่ผ่านการขึ้นรูปและนำมาใช้เป็น bipolar plate มีมูลค่าคิดเป็นประมาณร้อยละ 15 ของราคาเซลล์เชื้อเพลิง 1 stack (ไม่รวมระบบควบคุมอุปกรณ์ประกอบ หน่วยผลิตและป้อนแก๊ส)

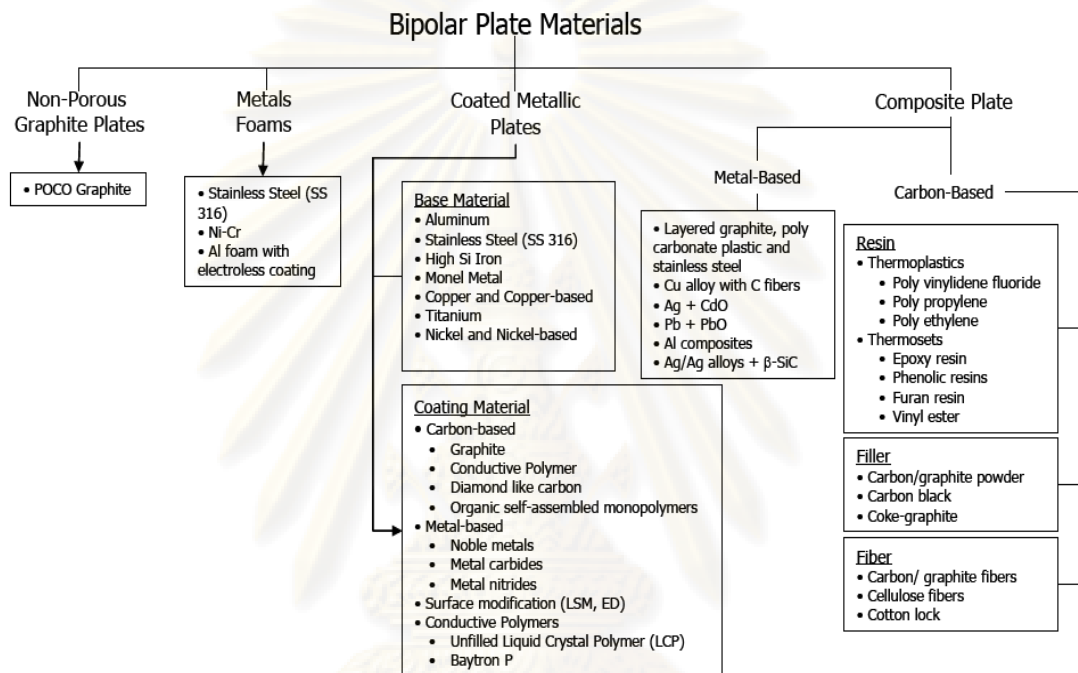
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 2.1 การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น bipolar plate [16]

วัสดุ	ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)	ข้อดี	ข้อเสีย
แกรไฟต์ (คาร์บอน- คาร์บอน)	200-300	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเสถียร - ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ - ความต้านทานสัมผัสกับ ขั้วไฟฟ้าต่ำ - ความต้านทานการกัดกร่อน สูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาแพง - เปราะ - มีความหนา
คาร์บอน-พอลิเมอร์	50-200	<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นต่ำ - อายุการใช้งานยาวนาน - มีสมบัติหลากหลาย 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เครื่องมือในการ ผลิตที่ซับซ้อน - สมบัติแต่ละทิศทางไม่ เท่ากัน - นำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้
โลหะ	$\sim 5 \times 10^5$	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าการนำความร้อนสูง - สามารถรีไซเคิลได้ - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความ สม่ำเสมอ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการการเคลือบที่ ทนการกัดกร่อนได้ - เป็นพิษต่อเยื่อ แลกเปลี่ยน - เกิดขนวนออกไซด์ที่ พื้นผิว

จากข้อดี-ข้อเสียของแกรไฟต์ และโลหะนี้ จึงได้มีการวิจัยเพื่อที่จะพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (ดังแสดงในรูปที่ 2.9) ไม่ว่าจะเป็นการนำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ทำจากโลหะมาเคลือบ เพื่อให้ทนทานต่อการกัดกร่อนหรือการออกแบบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ทำจากแกรไฟต์ให้มีขนาดเล็กกลง เพื่อช่วยลดปัญหาเรื่องน้ำหนัก และอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจศึกษาค้นคว้าเป็นอย่างมากก็คือ การปรับปรุงวัสดุที่จะนำมาสร้างโดยการทำเป็นวัสดุผสม (composite material) ด้วยการนำแกรไฟต์หรือโลหะรวมทั้งคาร์บอนมาผสมรวมกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง เช่น พอลิเมอร์ (polymer) โดยจะต้องนำมาผสมรวมกันในสัดส่วนปริมาณและวิธีการที่เหมาะสม ทั้งนี้สิ่งสำคัญในการสร้างแผ่น

นำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากวัสดุผสมนั้นอยู่ที่การเลือกวัสดุที่มีสมบัติที่เหมาะสม ซึ่งหากนำมาสร้างเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่มีสมบัติด้านต่างๆ เช่น ความแข็งแรงทนทาน กระจายไฟฟ้า และการให้พลังงานที่สูงขึ้น โดยมีน้ำหนักเบาและราคาต่ำลง เพื่อที่จะสามารถนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป [17]



รูปที่ 2.9 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากวัสดุชนิดต่างๆ [15]

สำหรับวัสดุที่เรียกว่าวัสดุผสม (composite material) ก็คือวัสดุที่เกิดจากการนำเอาวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมรวมกันเพื่อนำไปใช้ในการสร้าง สาเหตุที่ต้องมีการนำวัสดุมาผสมกันนั้นก็เพราะสมบัติหรือข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน แต่เมื่อนำมาผสมกันแล้ว ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีขึ้นเหมาะสมในการนำมาสร้างเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว โดยการผสมนั้นจะต้องทำในสัดส่วนและวิธีการที่เหมาะสมกลายเป็น carbon composite materials ที่มีสมบัติต่างๆดีขึ้น

2.4 วัสดุคอมพอสิต (Composite)

วัสดุคอมพอสิต คือ ระบบของวัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหรือมากกว่าที่แตกต่างกันชัดเจนโดยไม่ต้องละลายเข้าด้วยกัน

วัสดุคอมพอสิตมีองค์ประกอบหลัก ดังนี้

- **เมตริกซ์ (Matrix)** เป็นส่วนที่ต่อเนื่อง ช่วยหล่อหุ้ม และยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและมีการจัดเรียงตัวตามที่กำหนด โดยล้อมรอบและป้องกันส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสภาพแวดล้อม เมตริกซ์มักจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง ทำหน้าที่ถ่ายแรงที่ได้รับไปยังส่วนเสริมแรง
- **สารเสริมแรง (Reinforcement)** เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมพอสิต มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ได้แก่ เส้นใยต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar) วัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะได้หลายแบบ เช่น โครงสร้างเป็นแผ่นบาง เป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (continuous fiber) เส้นใยสั้น (chopped short fiber) หรือเส้นใยทอ (weaves) ซึ่งมีโครงสร้างและการจัดเรียงตัว (orientation) ของส่วนเสริมแรงต่างๆกัน

ข้อดีของวัสดุคอมพอสิต

- Specific strength สูง เนื่องจากน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุได้
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างให้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน
- ด้านทานการสึกหรอได้ดี อายุการใช้งานยาวนาน
- ทนทานต่อการล้าตัวได้ดี
- มีความเสถียรด้านรูปร่างสูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางด้านความร้อนต่ำ

ข้อเสียของวัสดุคอมพอสิต

- ต้นทุนด้านเครื่องมือการผลิตสูง
- สมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน

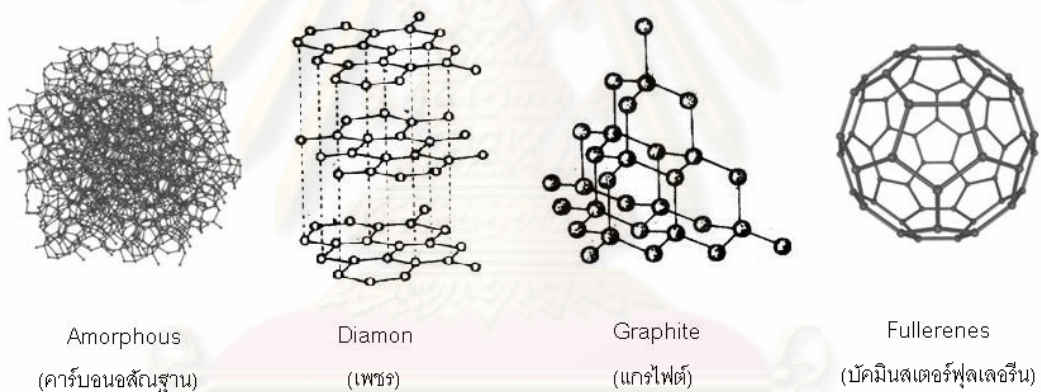
- เชื่อมติดกับวัสดุอื่นยาก
- การตรวจวิเคราะห์สมบัติค่อนข้างยาก
- การหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ยาก

2.5 วัสดุที่นำมาสร้างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุในการสร้างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ดังนี้

2.5.1 ผงคาร์บอน [18]

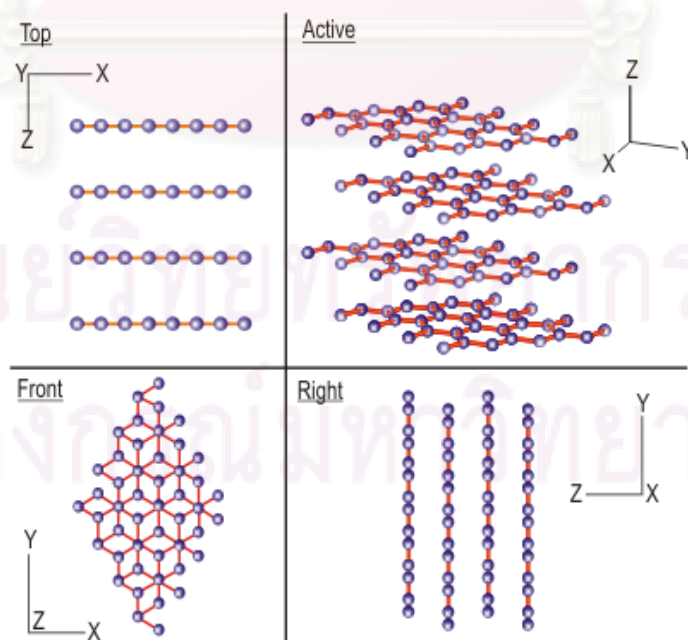
คาร์บอน เป็น ธาตุลำดับที่ 6 ในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ C เป็นธาตุอโลหะ และมีโครงสร้าง 4 แบบ คือ แบบอสัณฐาน แบบแกรไฟต์ แบบเพชร และแบบบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน ดังแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกของคาร์บอนอสัณฐาน เพชร แกรไฟต์ และบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน [18]

- เพชร (แร่ที่แข็งที่สุด) เกิดจากธาตุคาร์บอนเกือบบริสุทธิ์ คือประมาณ 99.95% ที่ถูกทับถมอยู่เป็นเวลานานใต้พื้นโลกด้วยแรงกดดันกว่า 3,000 ตัน อยู่ลึกประมาณ 80 กิโลเมตร เพชรเป็นแร่มีรูปร่างผลึก 8 เหลี่ยม มีความโปร่งใส และกึ่งโปร่งใส มีประกายแวววาว รอยตำหนิมีเหลี่ยมมุมฉากร ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเพชรถูกทับถมอยู่ใต้โลกเป็นเวลานานจึงมีความแข็ง และความหนาแน่นมากที่สุด
- แกรไฟต์ เป็นธาตุคาร์บอนที่มีสีดำเป็นมัน โครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งมีสมมาตรแบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral symmetry) ก๊าซของแกรไฟต์จะทึบแสง ยืดหยุ่น และสามารถตัดได้ แกรไฟต์ธรรมชาติจะมี

ความมัน และค่อนข้างอ่อนตัว มีค่าความแข็งประมาณ 1-2 ในหน่วยโมห์ (Moh scale) มีค่าความถ่วงจำเพาะโดยเฉลี่ยประมาณ 2.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แกรไฟต์เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าและตัวนำความร้อนที่ดีมาก มีจุดหลอมเหลวสูงที่ 3,500 องศาเซลเซียส มีความต้านทานต่อความเป็นกรดสูง ไม่ไวต่อสารเคมี ในเชิงพาณิชย์สามารถแบ่งรูปแบบแกรไฟต์ได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ แกรไฟต์อสัณฐาน (Amorphous graphite) ก้อนผลึกแกรไฟต์ (crystalline lump) หรือสายแร่แกรไฟต์ (Vein) และแกรไฟต์แบบเกล็ด (Flake graphite) โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์ประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอนเชื่อมต่อกันกันในแนวระนาบ ดังแสดงในรูป 2.11 แต่ละระนาบจะเรียงซ้อนต่อกันขึ้นไปทางด้านบนของแต่ละระนาบ โดยพันธะระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนในแนวระนาบจะมีความแข็งแรงมาก แต่แรงพันธะที่เชื่อมระนาบแต่ละระนาบจะไม่ค่อยแข็งแรง โดยปกติแล้วโครงสร้างคาร์บอนจะมีอะตอมอื่นๆ ข้างเคียง 4 อะตอม แต่ในแกรไฟต์นั้นจะมีอะตอมข้างเคียงแค่ 3 อะตอมเท่านั้น โดยสร้างเป็นพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมอื่นอีก 3 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน ภายในชั้นเดียวกัน ส่งผลให้คาร์บอนแต่ละอะตอมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเหลืออยู่ โดยอิเล็กตรอนไม่อยู่กับที่ เคลื่อนที่ได้อิสระทั่วไปภายในชั้นเดียวกัน แกรไฟต์จึงนำไฟฟ้าได้ดีเฉพาะทิศทางขนานกับชั้นของแกรไฟต์เท่านั้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์จากการมองในทุกทิศทาง [18]

2.5.2 พอลิเมอร์ [19]

ส่วนของพอลิเมอร์หรือสารช่วยยึดเกาะ (binder) ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองชั้นชนิดคอมพอสิต อาจเลือกใช้ได้ทั้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หรือพลาสติกเทอร์โมเซต (thermosetting plastic) ในการเลือกชนิดของพอลิเมอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับเทคนิคในกระบวนการผลิตที่มีอยู่ การนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เทอร์โมพลาสติกที่มีราคาถูกซึ่งมีขีดจำกัดในด้านความเสถียรต่ออุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม อาจนำไปใช้งานสำหรับอุปกรณ์แบบพกพาที่ทำงานในอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

ในการเลือกชนิดของพอลิเมอร์ คุณสมบัติที่มีความสำคัญ ได้แก่

- ความเสถียรต่ออุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (ปัจจุบันจำกัดอยู่ที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส)
- มีความเสถียรต่อความชื้น (การบวมตัวและการแยกสลายด้วยน้ำของวัสดุพอลิเมอร์ในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นผลให้โครงสร้างของแผ่นแตกเป็นชิ้น)
- มีความเสถียรต่อสารเคมีที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น สารออกซิไดส์ และน้ำ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่อนข้างมีความเป็นกรดอ่อน (อาจมีค่าต่ำถึง pH 4)
- ต้องไม่มีการปล่อยสารที่อาจมีแนวโน้มทำให้เกิดอิเล็กโทรออกซิเดชัน เช่น สารช่วยให้อ่อนตัว หรืออาจรบกวนการทำงานขององค์ประกอบอื่นๆ ในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น สารที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาและเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
- ขั้นตอนการผลิตเป็นคอมพอสิตรวดเร็ว และมีความหนืดต่ำ
- มีค่าการซึมผ่านได้ของแก๊สต่ำ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของเซลล์เชื้อเพลิง
- มีประสิทธิภาพในการเป็นสารยึดเกาะสูง (มีความสามารถในการรวมตัวกับสารเติมแต่งปริมาณมากได้ โดยไม่เกิดการแยกตัว หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน)

ตาราง 2.2 ชนิดของคาร์บอนคอมพอสิตที่ถูกนำมาใช้สร้างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [4]

Resin	Type of resin	Filler	Fiber
Poly(vinylidene fluoride)	thermoplastic	Carbon/graphite particles	
Poly(vinylidene fluoride)	thermoplastic	Carbon/graphite particles	Carbon/graphite fibers
polypropylene	thermoplastic	Carbon black, graphite powder	
Mixture of an epoxy resin and an aromatic amine hardener	thermoset	Graphite powder	
Phenyl-aldehyde resol or phenyl-aldehyde novolac	thermoset	Coke-graphite particles	
Phenyl-aldehyde resol or phenyl-aldehyde novolac	thermoset	Coke-graphite particles	Graphite fibers or whiskers
Phenolic resin	thermoset	Graphite powder	Cellulose fibers (but not rayon and cellulose acetate)
Phenol resin or furan resin	thermoset	Graphite powder	Cellulose fibers (but not rayon and cellulose acetate)
Phenolic resin	thermoset		Carbon fibers
Vinyl ester	thermoset	Graphite powder	Cotton flock (graphite/carbon, glass, cotton and polymer)

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เลือกรักษา พอลิเอสเตอร์เรซิน (polyester resin) เป็นสารช่วยยึดเกาะ ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะสามารถหลอมหรือละลายได้เพียงครั้งเดียว จากนั้นจะเกิดโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ผ่านพันธะโคเวเลนต์ที่แข็งแรง และไม่สามารถหลอมหรือละลายได้อีก ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมและมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

พอลิเอสเตอร์เรซิน [19] ประเภทเทอร์โมเซต จะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดสายโซ่ตรงไม่อิ่มตัว และแอลคิควิเรซิน

- พอลิเอสเตอร์ชนิดสายโซ่ตรงไม่อิ่มตัว จะมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล การเตรียมจะมีวัตถุดิบที่สำคัญ คือ ไดออล (diols) ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ โพรพิลีนไกลคอล (propyleneglycol) เนื่องจาก เข้ากับสไตรีนที่จะนำมาเป็นตัวเชื่อมโยงได้ดี และมีราคาถูก ช่วยทำให้พอลิเมอร์เกิดผลึก, กรดไม่อิ่มตัวและแอนไฮไดรด์ ที่นิยมใช้มากคือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) เพราะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาดี และให้น้ำออกมาน้อย, แอนไฮไดรด์ที่ใช้เป็นตัวดัดแปร (modifying agent) ใช้เพื่อให้พอลิเอสเตอร์มีสมบัติดีขึ้น ไม่แข็งและเปราะมาก เพราะพันธะคู่มาก นิยมใส่ฟธอลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) เพราะเชื่อว่ามันจะไปลดแอกติวิตีของพันธะคู่ ตัวช่วยให้เกิดการเชื่อมโยง แม้ว่าพอลิเอสเตอร์ชนิดโซ่ตรงไม่อิ่มตัวอาจเกิดการเชื่อมโยงกันเองระหว่างสายโซ่ได้ แต่จะเกิดอย่างช้าๆ และได้ดีกรีของการเชื่อมโยงต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีกรีของการเชื่อมโยงสูงขึ้น และรวดเร็วขึ้น นิยมใช้สารที่มีพันธะคู่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเติมลงไป เช่น สไตรีน (styrene) ซึ่งช่วยให้เกิดการเชื่อมโยง

โดยปกติเรซินที่เตรียมได้แม้ว่าจะใส่สไตรีน (styrene) ลงไปแล้วก็จะยังไม่เกิดการเชื่อมโยง เนื่องจากได้ใส่ตัวขัดขวางไว้ด้วย เพราะถ้าปล่อยให้เกิดการเชื่อมโยงไปแล้ว จะทำให้เรซินที่ได้นำไปขึ้นรูปลักษณะต่างๆ ไม่ได้ การขึ้นรูปต้องทำในขั้นตอนเดียวกับการเชื่อมโยง โดยการเชื่อมโยงทำได้โดยการอบหรืออบให้ความร้อน (curing) กระทำในขณะที่ขึ้นรูปเลย โดยเติมตัวเริ่มลงไป คือ เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide) การเชื่อมโยงจะเกิดตรงพันธะคู่

พอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว จะมีสมบัติแข็ง ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนความร้อนได้ดี สมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง และความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลที่ถูกเชื่อมโยง สมบัติทางเคมี มีความต้านทานตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี ยกเว้นพวก คลอโรฟอร์ม อะซีโตน เป็นต้น และมีความต้านทานกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ ได้ดีมาก การนำไปใช้งาน มักใช้ในรูปแผ่นกับรูปพลาสติกหล่อ

- แอลคิเดเรซิน (alkyd resin) เป็นพอลิเอสเตอร์ที่มีโครงร่างแบบตาข่าย (network polyesters) ซึ่งใช้มากในรูปที่เป็นวัสดุเคลือบผิว เรซินชนิดนี้จะละลายในตัวทำละลายที่เป็นของเหลว เมื่อนำไปใช้งานจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดโครงร่างแหทำให้แข็ง ใช้เป็นสีน้ำมันทาบ้าน

2.5.3 สารเติมแต่ง [20]

พอลิเมอร์มีอยู่หลายชนิดจึงมีการนำไปใช้งานแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติและความต้องการของงานประเภทนั้นๆ แต่มีอยู่หลายกรณีที่พอลิเมอร์เพียงลำพังไม่สามารถให้สมบัติที่ต้องการได้ จึงมีการนำพอลิเมอร์มาผสมกับวัสดุอื่นตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไป เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ได้ตามความต้องการของการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุที่นำมาผสมรวมกับพอลิเมอร์นี้เรียกว่า สารปรับแต่งหรือสารเติมแต่ง (additives) โดยสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ทางด้านใดด้านหนึ่ง ดังต่อไปนี้

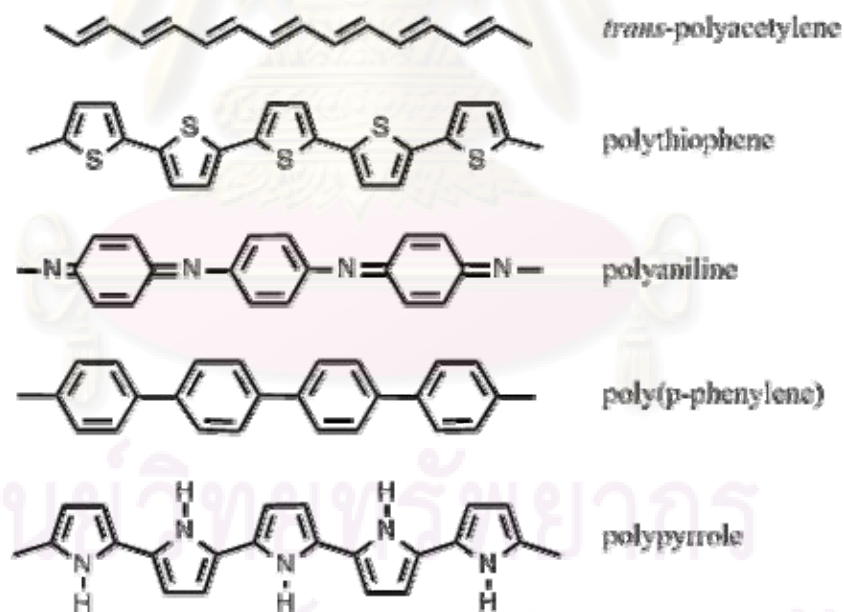
- ปรับปรุงลักษณะเฉพาะของกระบวนการ เช่น ลดความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยการ
ใช้สารหล่อลื่น
- ปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้ายโดยการรวมเข้าเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์
ในบางครั้งสารเติมแต่งอาจนำมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายของวัสดุลง แม้ว่าโดยปกติ
สารเติมแต่งจะมีราคาแพงกว่าพอลิเมอร์ก็ตาม แต่ก็ยังเป็นที่ยอมรับ เนื่องจากสารเติมแต่งช่วยลด
จุดบกพร่องที่สำคัญของพอลิเมอร์โดยเฉพาะวัสดุในทางวิศวกรรมให้มีความแข็งแรงดี ความแข็งแรง
และมีจุดอ่อนตัวต่ำ สามารถใช้สารเติมแต่งช่วยทำให้วัสดุนั้นๆเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน
ได้มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ เส้นใยคาร์บอนมาเป็นสารเติมแต่ง ซึ่งเส้นใยคาร์บอนสามารถใช้เป็นสารเสริมแรงและนำกระแสไฟฟ้า ได้จากการไพโรลิซิสเส้นใยอินทรีย์ต่างๆ ที่นิยมใช้คือ พอลิอะคริโลไนไตรล์ประกอบด้วยคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) เสริมแรงด้วยเส้น

ใยแกรไฟต์ชนิดผลึก (crystalline graphite fibrils) โดยมีอัตราส่วนของความแข็งแรงดึงต่อความถ่วงจำเพาะเป็น 3.5 เท่าของเหล็กกล้า ช่วยทำให้เกิดการหล่อลื่น (lubricity) สูงและการนำไฟฟ้าสูงด้วย

2.5.4 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conductive polymer) [21, 22]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถนำไฟฟ้าได้เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระ เพราะมีโครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วย พันธะเดี่ยวสลับกับพันธะคู่ โดยโครงสร้างของโมเลกุลจะมีพันธะเดี่ยว หรือพันธะซิกมา (sigma bond) ที่มีความแข็งแรงและไม่เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพันธะ ในขณะที่พันธะคู่จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า เรียกว่าพันธะไพ (pi bond) [21] พอลิเมอร์ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ตัวอย่างเช่น พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene), พอลิไทโอฟีน (polythiophene), พอลิไพร์โรล (polypyrrole), พอลิอะนิลีน (polyaniline), พอลิเฟนิลีน (poly(p-phenylene)) ดังรูป 2.12 และมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.12 พอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่างๆ [21]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่างๆ [21]

Polymer	Conductivity ($\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)	Stability (doped state)	Processing possibilities
Polyacetylene	$10^{-3}-10^{-5}$	poor	limited
Polyphenylene	1000	poor	limited
Poly- <i>p</i> -phenylenesulfide	100	poor	excellent
Poly- <i>p</i> -phenylenevinylene	1000	poor	limited
Polypyrroles	100	good	good
Polythiophenes	100	good	excellent
Polyaniline	10	good	good

พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีข้อดี คือ มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการกัดกร่อน ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี และมีความยืดหยุ่น จึงถูกนำมาใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์และผลิตภัณฑ์ต่างๆหลายรูปแบบ เช่น หลอดเปล่งแสง (light emitting polymer, LEP)

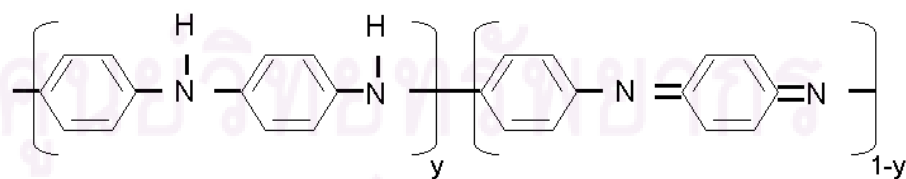
วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธี แต่มีวิธีที่สำคัญๆ 4 วิธี [22] คือ

1. ไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้เตรียมพอลิเมอร์นำไฟฟ้า สามารถเตรียมได้โดยให้ความร้อนกับมอนอเมอร์ เพื่อไล่ตัวทำละลายที่ระเหยง่ายออกมาโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 85 องศาเซลเซียส จากนั้นให้ความร้อนสูงขึ้นอีกเพื่อกำจัดเศษที่เหลือออกมาออกไป ช่วงนี้จะให้อุณหภูมิประมาณ 350-600 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นค่อยๆลดอุณหภูมิลง พอลิเมอร์จะค่อยๆ เกิดขึ้น วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ใช้อุณหภูมิสูง
2. ซีเกลอร์-แนตตา คะตะลิสต์ (Zirgler-Natta catalyst) เป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยใช้สารเร่ง พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปฟิล์มพอลิเมอร์ ข้อดีของวิธีนี้ คือ ไม่ต้องใช้พลังงานในการเตรียมมาก แต่มีข้อเสีย คือ พอลิเมอร์มีความบริสุทธิ์ต่ำ และใช้ได้กับพอลิเมอร์บางชนิด
3. การสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical synthesis) วิธีนี้จะเตรียมโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมลงในสารละลายที่มีมอนอเมอร์อยู่เพื่อออกซิไดส์ให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

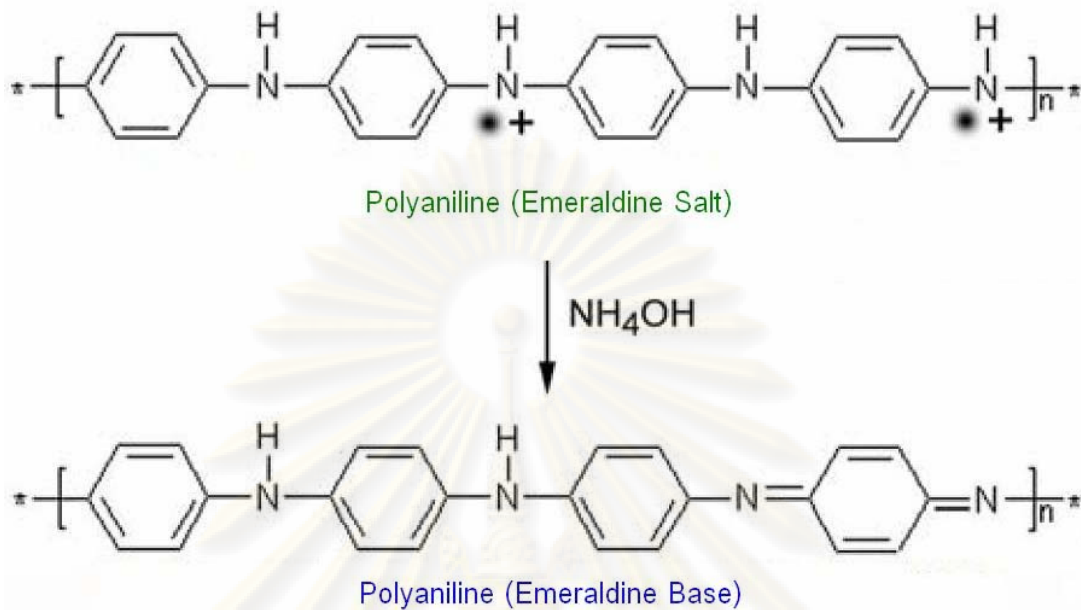
(polymerization) ที่ช้าลงไฟฟ้า ข้อดี คือ พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง ข้อเสีย คือ ไม่สามารถสังเคราะห์สารในปริมาณมาก ๆ ได้ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า เป็นวิธีที่นิยมใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าหลายชนิด

4. วิธีการสังเคราะห์ทางเคมี (chemical polymerization) วิธีนี้เตรียมโดยใช้สารเคมีเป็นตัวออกซิแดนท์หรือตัวริเริ่ม (oxidant) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรซันของมอนอเมอร์ วิธีนี้มีข้อดี คือ เตรียมพอลิเมอร์ได้ในปริมาณมาก พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูงพอควร และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่เฉพาะ แต่มีข้อเสีย คือ ควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาได้ยาก

พอลิอะนิลีน (polyaniline) เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี สังเคราะห์ง่าย ราคาถูก โครงสร้างของพอลิอะนิลีนแสดงดังรูปที่ 2.13 พอลิอะนิลีนสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งทางเคมีและทางเคมีไฟฟ้า โดยสมบัติของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะขึ้นกับวิธีและสภาวะของการสังเคราะห์ด้วย สมบัติของการนำไฟฟ้าของพอลิอะนิลีนขึ้นอยู่กับหน่วย reduced repeating units (y-value) โดยพอลิอะนิลีนที่มีการนำไฟฟ้า คือในรูป polyemeraldine หรือ polyemeraldine salt (PANI-ES) ซึ่งมีสีเขียว และค่าการนำไฟฟ้า 15 ซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนพอลิอะนิลีนที่ไม่นำไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของ polyemeraldine base (PANI-EB) ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้า 10^{-5} ซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร โดย PANI-EB สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูป PANI-ES ได้โดยการโด๊ป (doping) ด้วยกรด [23] แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพอลิอะนิลีน [23]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของพอลิอะนิลีน emeraldine salt และ emeraldine base [23]

2.6 เทคโนโลยีการขึ้นรูป [24, 25]

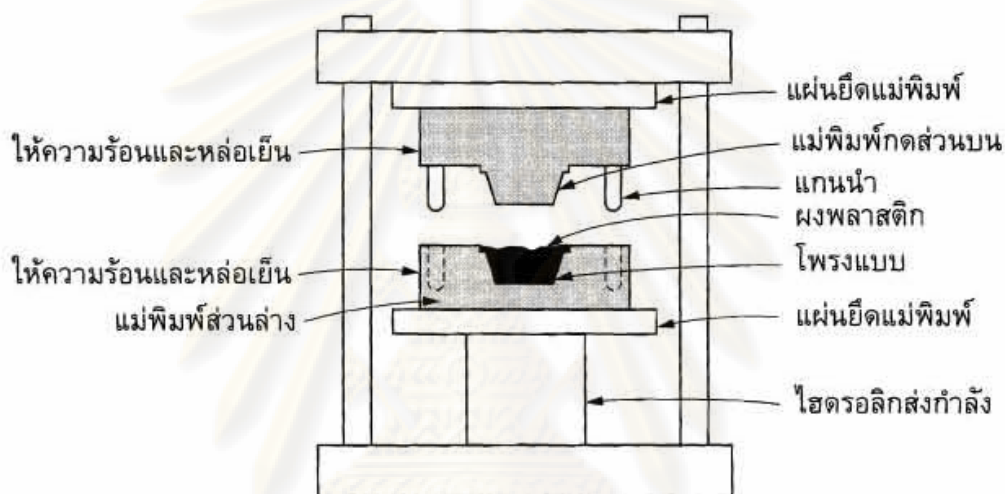
วิธีการที่สำคัญที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต คือ

- Compression molding
- Injection molding
- Two-component injection molding
- Perform molding

วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นในการเลือกวิธีในการขึ้นรูปจะต้องคำนึงถึงวัสดุที่จะนำมาใช้ด้วย เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีข้อจำกัดต่อกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน [24]

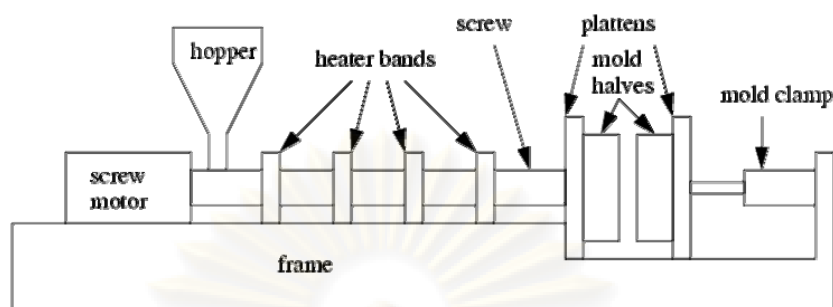
สำหรับการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ (compression molding) เริ่มต้นจากการใส่เรซินและผงคาร์บอนหรือสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งถูกผสมให้เข้ากันอย่างดี และนำไปบรรจุไว้ระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้ และแม่พิมพ์ตัวเมียดังแสดงในรูปที่ 2.15 แม่พิมพ์ทั้ง 2 ตัวถูกทำให้ร้อน แต่จะมีแม่พิมพ์เพียงตัวเดียวที่เคลื่อนที่ได้ พอแม่พิมพ์ปิดลงความร้อนพร้อมกับความดันจะทำให้เนื้อเรซินแน่น และความร้อนของแม่พิมพ์จะทำให้เรซินหลอมตัวเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน จากนั้นปล่อยให้

ให้แม่พิมพ์เย็นตัวลงโดยการหล่อเย็น ทำให้เรซินแข็งตัว จะได้ชิ้นงานออกมา ถ้าวัสดุที่นำมาใช้สร้างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเป็นประเภท เทอร์โมเซต ก่อนที่จะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เทอร์โมเซตแต่ละชนิดนั้นจะมีความต้องการระยะเวลาการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ (crosslinking) ต่างกัน ถ้าเป็นเทอร์โมพลาสติก ก่อนที่จะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้น โดยเวลาที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โมพลาสติก จะอยู่ที่ประมาณ 15-20 นาที



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ [25]

การฉีดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ (injection molding) ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 2.16 เทอร์โมเซตสามารถขึ้นรูปโดยวิธีการฉีด ซึ่งให้อัตราการผลิตที่สูงมาก หากเปรียบเทียบกับแบบอัดขึ้นรูปแล้ว วิธีนี้มีความเร็วมากกว่า 2-3 เท่า วิธีการฉีดนี้พลาสติกจะถูกส่งผ่านลงไปในระบบช่องทางฮอปเปอร์ (hopper) ในขณะที่สกรู (screw) ซึ่งมีลักษณะเป็นเกลียวทำหน้าที่ขับเคลื่อนพลาสติกไปสู่ห้องร้อน ซึ่งพลาสติกจะหลอมกลายเป็นของเหลวหนืด จากนั้นของเหลวจะถูกผลักต่อไปทางด้านหน้าและฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ความดันจะถูกอัดค้างไว้จนกระทั่งพลาสติกแข็งตัว จากนั้นจึงนำชิ้นงานออกมา การฉีดพลาสติกหลอมเหลวนั้น ช่วงแรกความหนืดของพลาสติกจะลดลงเมื่อได้รับความร้อน แต่เมื่อเวลาผ่านไปความหนืดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากพลาสติกเกิดการเชื่อมขวาง ดังนั้นการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์จะต้องฉีดในสภาวะที่ความหนืดยังต่ำอยู่ และขณะที่พลาสติกอยู่ในแม่พิมพ์ ก็ต้องมีเวลามากพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์สมบูรณ์จนกระทั่งเกิดการแข็งตัว [25]



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีฉีด[25]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hui และคณะ [26] ศึกษาการเตรียมแผ่นคอมพอสิตจากแกรไฟต์และผงคาร์บอน โดยใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นสารช่วยในการยึดเกาะ โดยจะทำการศึกษาชนิดของแกรไฟต์คือ แกรไฟต์ธรรมชาติและแกรไฟต์สังเคราะห์ พบว่า แผ่นแกรไฟต์คอมพอสิตที่เตรียมจากแกรไฟต์ธรรมชาติจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าแกรไฟต์สังเคราะห์ และสภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมแผ่นแกรไฟต์คอมพอสิตคือ ปริมาณฟีนอลิกเรซินร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักและปริมาณผงคาร์บอนร้อยละ 4-5 โดยน้ำหนัก และส่วนที่เหลือคือผงแกรไฟต์ สภาวะในการขึ้นรูปที่ความดัน 10-12 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะนี้แผ่นคอมพอสิตที่เตรียมได้จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 80 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตรและมีค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) สูงกว่า 40 เมกะปาสคาล

Novak และ Krupa [27] ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ของอีพอกซี และพอลิยูรีเทนเรซิน ที่เติมด้วยแกรไฟต์สังเคราะห์ 2 ชนิด คือ KS6 และ KS15 รวมถึงศึกษาสมบัติเชิงกล คือ ความแข็ง และความแข็งแรงของการยึดเกาะกับแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แกรไฟต์ทั้งสองชนิด มีสัดส่วนคาร์บอนอยู่มากกว่าร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนักและสัดส่วนของเถ้าน้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคของผงแกรไฟต์โดยเฉลี่ยร้อยละ 90 ของอนุภาคทั้งหมด พบว่า KS15 มีขนาดอนุภาค 15 ไมโครเมตร และ KS6 มีขนาดอนุภาค 6 ไมโครเมตร การวัดสมบัติทางไฟฟ้าจะขึ้นรูป โดยใช้แกรไฟต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ผสมกับพอลิเมอร์ อีพอกซี และพอลิยูรีเทนเรซิน (ซึ่งใช้สัดส่วนของน้ำหนักพอลิเมอร์และสารช่วยแข็งตัว เป็น 2:1) พบว่าแผ่นคอมพอสิตที่ใช้ผงแกรไฟต์ต่างชนิดกันมีค่าขีดเริ่มการไหลซึม (percolation concentration) ซึ่งเป็นความเข้มข้นของตัวเติมที่วัดได้เมื่อมีการเชื่อมโครงข่ายนำไฟฟ้าของ

อนุภาคตัวเติมภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์เท่ากัน คือ ร้อยละ 22 โดยปริมาตร ดังนั้น ความแตกต่างของชนิดแกรไฟต์ที่ใช้ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการนำไฟฟ้า และค่าขีดเริ่มการไหลซึมผ่าน สำหรับค่าความแข็ง จะลดลงเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดสำหรับแผ่นคอมโพสิตพอลิยูรีเทน/แกรไฟต์ KS6 ค่าความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดสำหรับแผ่นคอมโพสิตอีพอกซี/แกรไฟต์ KS6

Hwang และคณะ [28] ศึกษาการเตรียมแผ่นคอมโพสิตสำหรับใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากเส้นใยคาร์บอนและใช้อีพอกซีเป็นสารช่วยในการยึดเกาะ โดยทำการผสมเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 120 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ให้แผ่นมีลักษณะขรุขระเป็นคลื่นเพื่อเป็นช่องทางการไหลของแก๊ส แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า ชิ้นงานสามารถทนต่อแรงกดอัดได้ 3.3 เมกะปาสคาล ทนต่อแรงยึดดึงได้ 520 เมกะพาสคัล ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สต่ำ และค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานวัดในแนวระนาบ (in-plane) มีค่า 300 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีความเสถียรทางความร้อน ผลจากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่เตรียมได้มีความเหมาะสมในการใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้า ในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

Li และคณะ [29] ศึกษาค่าความต้านทานการสัมผัส (contact resistance) ของแผ่นแกรไฟต์ (natural graphite-NG) ฟีนอลฟอर्मัลดีไฮด์ ที่มีการปรับปรุงโดยเติมแกรไฟต์ (expanded graphite) เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติม ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน นำแกรไฟต์ (NG) ผสมกับฟีนอลฟอर्मัลดีไฮด์ แล้วนำไปอัดขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 50 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ส่วนชิ้นงานที่มีการปรับปรุงโดยเติมแกรไฟต์ (expanded graphite) ทำโดยผสมแกรไฟต์ (NG) ผสมกับฟีนอลฟอर्मัลดีไฮด์ แล้วนำไปอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อไม่ให้เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ฟีนอลฟอर्मัลดีไฮด์ แล้วจึงเติมแกรไฟต์ (expanded graphite) เข้าไป แล้วนำไปอัดขึ้นรูปอีกครั้งโดยใช้ความดัน 50 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จากการเปรียบเทียบ พบว่า การเติมแกรไฟต์ (expanded graphite) จะช่วยลดค่าความต้านทานการสัมผัส (contact resistance) ลงได้ถึงร้อยละ 37

Bhlapibul [30] ศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมโพสิตฐานแกรไฟต์โดยใช้สารยึดเกาะประเภทพลาสติคเทอร์โมเซต ได้แก่ พอลิเอสเตอร์ (POE) ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิเดเรซิน (PhA) เรซินผสม (POE และ 10%wt. PhA) และอีพอกซีเรซิน (EP) รวมทั้ง

ศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และเชิงกล ผลการทดลองพบว่า POE สามารถรวมตัวกับผงแกรไฟต์ได้ดี (อิมิตัวที่ผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก) รวมทั้งให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูง ส่วนสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน (EP) จะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น การศึกษาผลของสารเติมแต่ง พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรทจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานลดลงเล็กน้อย แต่จะช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ จะช่วยให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานดีขึ้น ส่วนเส้นใยคาร์บอนจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในชิ้นงานที่ใช้ POE และ EP เป็นสารช่วยยึดเกาะ การนำส่วนผสมที่ได้จากกระบวนการเวทเลย์ (Wet-lay) ผสมลงในส่วนผสมของแกรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ POE เป็นสารช่วยยึดเกาะ สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลและลดค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน เมื่อนำแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง พบว่ายังให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ 34 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

Jia และคณะ [31] ศึกษาการนำไฟฟ้าของพอลิอะนิลีนผสมอีพอกซีเรซิน โดยพอลิอะนิลีนมีโครงสร้างที่ต่างกัน คือ เป็นอนุภาค ขนาด 200นาโนเมตร ,เส้นใย (fibers) เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย 200 นาโนเมตร ,ความยาวเส้นใย 2 ไมครอน และเส้นใยยาว (wires) เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย 200 นาโนเมตร ,ความยาวเส้นใยมากกว่า 2 ไมครอน ทำการเตรียมพอลิอะนิลีนที่มีโครงสร้างเป็นอนุภาคโดยวิธีเคมี (conventional polymerization) โดยนำอะนิลีนโมโนเมอร์ ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ละลายในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ใช้แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์โซลเฟตเป็นสารออกซิแดนท์ และพอลิอะนิลีนที่เป็นเส้นใยและเส้นใยขนาดยาวโดยวิธีพอลิเมอไรเซชันที่บริเวณผิวหน้าสัมผัส (interfacial polymerization) กระบวนการพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง organic phase และ aqueous phase (organic phase คือ ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม ,aqueous phase คือ สารละลายอะนิลีนโมโนเมอร์) พบว่า เมื่อเติมอีพอกซีเรซินลงไปในพอลิอะนิลีน ทำให้โครงสร้างของพอลิอะนิลีนเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย การที่พอลิอะนิลีนที่มีโครงสร้างต่างๆ กระจายตัวในอีพอกซีเรซินที่ดี จะทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และพอลิอะนิลีนที่มีโครงสร้างแบบเส้นใยแบบยาว (wires) จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นเส้นยาว จึงตกตะกอนได้ยาก ส่วนพอลิอะนิลีนที่มีโครงสร้างแบบอนุภาคและแบบเส้นใยสั้นจะตกตะกอนได้ง่ายกว่า ค่าการนำไฟฟ้าจึงไม่ดี

Xia และคณะ [32] ศึกษาการเตรียมแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตอัดขึ้นรูปโดยใช้พอลิฟีนิลีน ซัดไฟด์ เรซิน เป็นสารช่วยในการยึดเกาะ พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตจะลดลงเมื่อมีปริมาณของเรซินมากขึ้น แต่สมบัติในการงอตัว (bending strength) จะดีขึ้น ปริมาณเรซินที่เหมาะสมที่สุด คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่มีปริมาณเรซินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ใช้คุณสมบัติในการอัดขึ้นรูป 380 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะมีค่าการนำไฟฟ้า 118.9 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่มีปริมาณเรซินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ใช้คุณสมบัติในการอัดขึ้นรูป 390 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะมีค่าการนำไฟฟ้า 105 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- | | |
|---|----------------------------------|
| 1. ผงแกรไฟต์ (RGN-C) | บริษัทสุธิยูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด |
| 2. ผงแกรไฟต์ (BDH) | U.S. Laboratory |
| 3. ผงแปรงถ่าน | บริษัทสุธิยูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด |
| 4. เส้นใยคาร์บอน : AGM 94 | Asbury Graphite Mills, Co.Ltd. |
| 5. พอลิเอสเทอร์เรซิน
(สไตรีนมอนอเมอร์ 35%) | บริษัทรุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด |
| 6. เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKP) | บริษัทรุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด |
| 7. โคบอลต์ แนฟทีเนต | บริษัทรุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด |
| 8. อะนิลีน มอนอเมอร์ | บริษัท Panreac |
| 9. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น | บริษัท Sigma-Aldrich |
| 10. แอมโมเนียมเปอร์ออกซีไดซัลเฟต | บริษัท Ajax Finechem |
| 11. โฟแทสเซียมไปโอไอเดต | บริษัท Panreac |
| 12. โซเดียมไฮโปคลอไรต์ | บริษัท Ajax Finechem |
| 13. ซิลเวอร์เพน্থ์ | บริษัทเอสพีไอ ซัพพลายส์ จำกัด |
| 14. น้ำกลั่น | |

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องชั่งน้ำหนักซึ่งได้ละเอียดทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง
2. เครื่องกวนผสม (Overhead stirrer) รุ่น RW20.n ยี่ห้อ KIKA works
3. เครื่องกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) รุ่น LP20 ยี่ห้อ Labtech
4. เครื่องวัดความหนา (Thickness guage) รุ่น 547-401 Mitutoyo
5. มัลติมิเตอร์ (Multi-meter) Model RM-15 Sangchai meter
6. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) รุ่น HY 3002 ยี่ห้อ COMMUE

7. อุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า (four point probe)
8. Scanning electron microscope (SEM) JEOL JSM 5800LV
9. Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) Nicolet 6700
10. Thermogravimetric analyzer TGA2950
11. เครื่องมือทดสอบค่าความแข็งแรงดัด LLOYD LR 10K PLUS
12. เครื่องมือทดสอบสมบัติความแข็ง (ดูโรมิเตอร์) REX Guage 2000
13. นาฬิกาจับเวลา
14. ตู้อบ
15. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส รุ่น CG840 ของบริษัท SCIENTIFIC PROMOTION
16. Suction pump พร้อมชุดเครื่องแก้ว
17. กระดาษกรองเบอร์ 42
18. อลูมิเนียม ฟอยล์
19. ปีกเกอร์และอ่างผสมสแตนเลส
20. ปากกาหนีบชิ้นงาน

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนโดยวิธีเคมีแบบดั้งเดิม [33]

- เตรียมสารละลายส่วนที่ 1 : เตรียมอะนิลีนไฮโดรคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร โดยนำอะนิลีนมอนอเมอร์ 1.82 มิลลิลิตร ละลายในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร
 - เตรียมสารละลายส่วนที่ 2 : เตรียมสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ออกซีไดซัลเฟต(APS) ความเข้มข้น 0.25 โมลต่อลิตร โดยนำแอมโมเนียมเปอร์ออกซีไดซัลเฟต 5.71 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ให้มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร
- ตั้งสารละลายทั้งสองส่วนทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายทั้งสองส่วนผสมลงในปีกเกอร์ แล้วทำการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พอลิอะนิลีนที่สังเคราะห์ได้นำไปกรองผ่านชุดกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร จนสารละลายที่ออกมาเปลี่ยนเป็นไม่

มีสี แล้วจึงล้างตะกอนด้วยอะซิโตน 20 มิลลิลิตร นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้พอลิอะนิลีนสีเขียวเข้ม

3.3.2 การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ [34]

นำอะนิลีนมอนอเมอร์ 1 มิลลิลิตร ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการกวนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมไปโอไอเดตความเข้มข้น 0.012 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และ 5% โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงไป กวนต่ออีก 5 นาที ตั้งสารละลายผสมทิ้งไว้ 20 นาที ตะกอนสีเขียวของพอลิอะนิลีนจะค่อยๆ เกิดขึ้น จากนั้นนำไปกรองผ่านชุดกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จนสารละลายที่ออกมาเปลี่ยนเป็นไม่มีสี แล้วจึงล้างตะกอนด้วยอะซิโตน 20 มิลลิลิตร นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์สีเขียวเข้ม

3.3.3 การปรับสภาพของคาร์บอน [35]

นำผงแปรงถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำไปแช่ในกรดผสมซัลฟิวริกและไนตริกเข้มข้น ในอัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตร ทำการกวนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จนผงแปรงถ่านผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกับกรด หลังจากนั้นนำมากรองผ่านชุดกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งน้ำที่ได้จากการล้างตะกอนมีความเป็นกลาง แล้วจึงนำตะกอนที่กรองได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

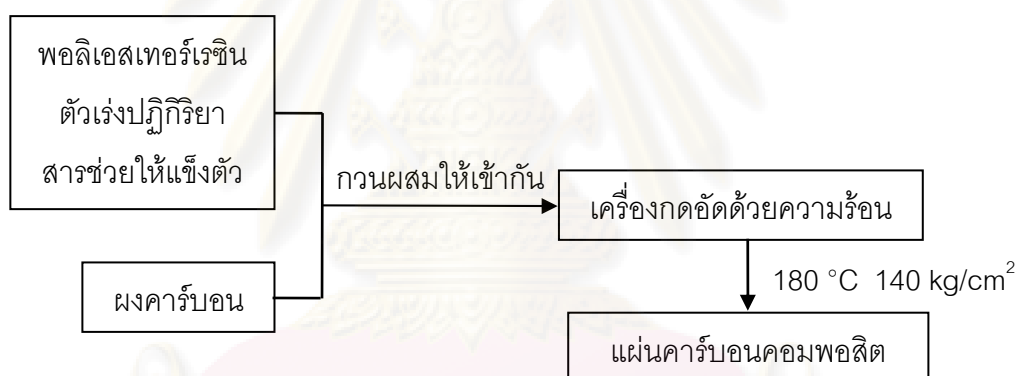
3.3.4 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของชนิดคาร์บอนและอัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์บอน

การศึกษาค่าผลของชนิดคาร์บอน ใช้ผงคาร์บอน 4 ชนิด คือ RGN, BDH, ผงแปรงถ่าน และ ผงแปรงถ่านที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด โดยเลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะตามการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยของเสาวลักษณ์ [30]

ในขั้นตอนการผสมจะใช้เครื่องกวนผสมและอ่างสแตนเลส โดยจะเติมพอลิเอสเตอร์เรซินลงในอ่างผสม จากนั้นเติมโคบอลต์เนฟทีเนตซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของพอลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้ กวนผสมให้เข้ากันดีโดยใช้ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที จากนั้นเติมเมทิลซีโตนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยาหรือเรียกว่าสารที่ช่วยให้

แข็งตัว ในปริมาณ ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของพอลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้ กวนผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมผงคาร์บอนแต่ละชนิดลงไป โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณผงคาร์บอนในการทดลองที่ร้อยละ 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เมื่อกวนส่วนผสมจนเข้ากันดีแล้ว นำส่วนผสมมาใส่ในแม่พิมพ์สแตนเลสตามขนาดที่ต้องการ โดยส่วนผสมมีน้ำหนักต่อปริมาตรประมาณ 2 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขึ้นอยู่กับขนาดของแม่พิมพ์ นำอลูมิเนียมฟอยล์ มารองด้านบนและด้านล่างก่อนประกบแม่พิมพ์ด้วยแผ่นสแตนเลส เพื่อป้องกันชิ้นงานติดแผ่นสแตนเลส จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [30] เป็นเวลา 20 นาที แล้วหล่อเย็นอีก 20 นาที จึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปเพื่อศึกษาผลของชนิดคาร์บอนและอัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์บอน

3.3.5 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน

การศึกษาค้นคว้าผลของการเติมพอลิอะนิลีน จะใช้พอลิอะนิลีนที่ได้จากการเตรียมทั้ง 2 วิธี ที่ได้กล่าวไปข้างต้น และแยกศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตออกเป็น 2 วิธี โดยใช้ผลแปรปรวนและใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ (พอลิอะนิลีนที่เติมจะไปแทนที่ในสัดส่วนของพอลิเอสเตอร์เรซิน) สัดส่วนการผสมแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยใช้ปริมาณของผงคาร์บอนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3.4

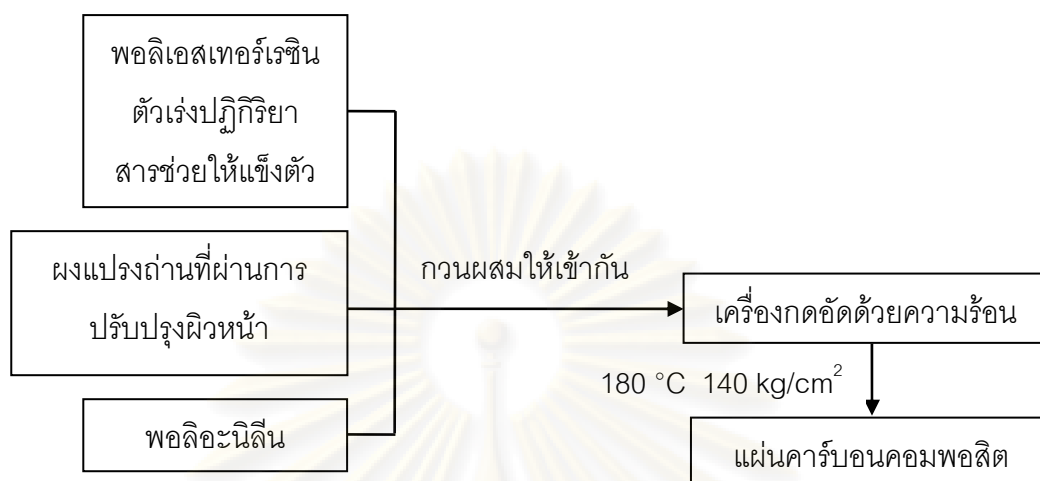
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนการผสมเพื่อศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน

ร้อยละของ พอลิอะนิลีน	ร้อยละของ พอลิเอสเทอร์เรซิน	ร้อยละของคาร์บอน
2	23	} 75
5	20	
7	18	
10	15	
13	12	
15	10	
18	7	

3.3.5.1 การเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการเติม

ในขั้นตอนการผสมจะเริ่มจาก เติมพอลิเอสเทอร์เรซินลงในอ่างผสม จากนั้นเติมโคบอลต์เนฟทีนซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของพอลิเอสเทอร์เรซินที่ใช้ กวนผสมให้เข้ากันดีโดยใช้ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที จากนั้นเติมเมทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยาหรือเรียกว่าสารที่ช่วยทำให้แข็งตัว ในปริมาณ ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของพอลิเอสเทอร์เรซินที่ใช้ กวนผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมผงแปรงถ่านที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยกรดลงไป ในปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก และเติมพอลิอะนิลีนโดยจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณในการทดลองที่ร้อยละ 2, 5, 7, 10, 13, 15 และ 18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ในส่วนของขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานจะทำเหมือนในหัวข้อ 3.3.4



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปเพื่อศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการเดิม

3.3.5.2 การเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการผสม

การเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตวิธีนี้ จะทำการผสมผงแป้งถ่านลงไป ในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนเลย โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

- การเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนจากการสังเคราะห์โดยวิธีเคมีแบบดั้งเดิม โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณในการทดลองที่ร้อยละ 2, 5, 7, 10, 13, 15 และ 18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทำการเตรียมสารละลาย 2 ส่วน ตามที่ได้กล่าวไป ในหัวข้อ 3.3.1 เมื่อผสมสารละลายทั้ง 2 ส่วน เข้าด้วยกันแล้ว จะทำการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้น สังเกตจากการที่สารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีเขียว จะเริ่มทำการผสมผงแป้งถ่านลงไป ในปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก แล้วจึงกวนต่อไป อีก 2 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันดี และตั้งทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมง จึงนำมากรอง ผ่านชุดกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

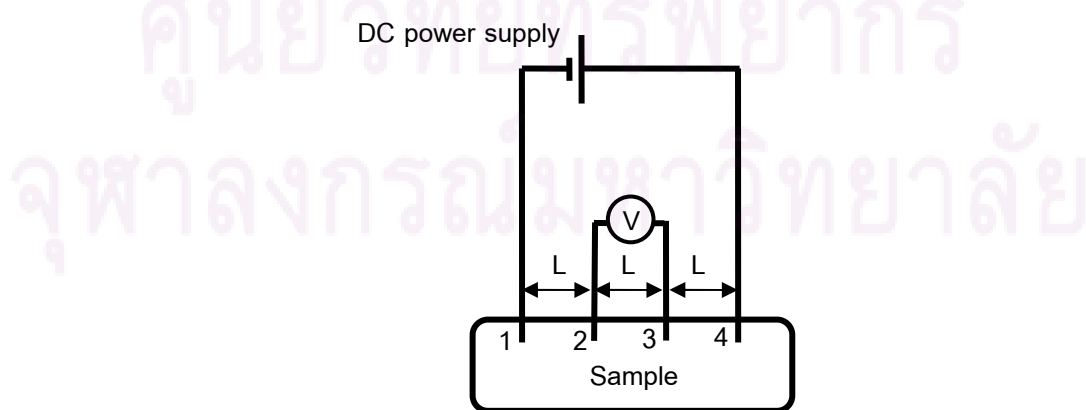
- การเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณในการทดลองที่ร้อยละ 2, 5, 7, 10, 13, 15 และ 18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นำอะนิลีนมอนอเมอร์ 1 มิลลิลิตร ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการกวนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮโป

โอเดตความเข้มข้น 0.012 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และ 5% โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงไป ตั้งสารละลายผสมทิ้งไว้ 20 นาที ตะกอนสีเขียวของพอลิอะนิลีนจะค่อยๆ เกิดขึ้น แล้วจึงเติมผงแป้งลงไปในผสม ในปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ทำการกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปกรองผ่านชุดกรองสูญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ในส่วนขั้นตอนของการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานจะทำตามในหัวข้อ 3.3.4

3.3.6 การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) ของคาร์บอนคอมพอสิตโดยเทคนิค four point probe

Four point probe เป็นเทคนิคที่ใช้วัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน โดยวัดความต้านทานของตัวอย่าง ส่วนประกอบของเครื่อง four point probe เป็นดังรูป 3.3 ซึ่งจะประกอบด้วยแท่งโลหะขนาดเล็ก 4 อัน ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีเป็นขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างแท่งโลหะแต่ละอันจะมีขนาด 1 เซนติเมตร เท่ากัน ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบค่าการนำไฟฟ้าจะมีขนาดยาว 120 มิลลิเมตร กว้าง 20 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร หลังจากขึ้นรูปแล้วจะนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทาน้ำยาซิลเวอร์พท์ตรงจุดสัมผัสของการวัดเพื่อให้เกิดจุดเชื่อมต่อของวงจรไฟฟ้าและลดค่าความต้านทานสัมผัส (Contact resistance) ในการวัดความต้านทานของตัวอย่าง จะให้กระแสไฟฟ้าคงที่จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงผ่านขั้วคู่ที่อยู่ด้านนอก (1 และ 4 ในรูป 3.3) แล้ววัดศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วคู่ที่อยู่ด้านใน (2 และ 3 ในรูป 3.3) โดยการวัดแสดงดังรูปที่ 3.4 แล้วนำไปคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้ายึดสมการที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของการวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ Four-Point Probe

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (3.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

โดยที่

ρ = สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \text{ cm}$)

σ = สภาพการนำไฟฟ้า (S.cm^{-1})

V = ความต่างศักย์ (V)

R = ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

I = กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (A)

A = พื้นที่หน้าตัด (cm^2)

L = ระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 2 และ 3 (cm)

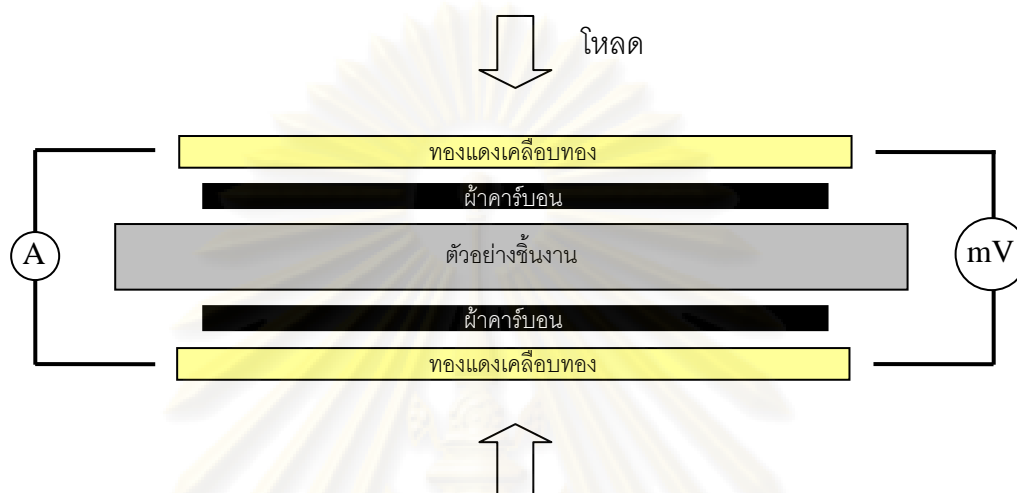


รูปที่ 3.4 การวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค four point probe

3.3.7 การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane)

การวัดค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตแสดงการ
จัดเรียงอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.5 โดยให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าในช่วง 0.1-0.4 แอมแปร์ และ
วัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานด้วยมัลติมิเตอร์ เมื่อได้ค่าความต่างศักย์ จึงนำค่าที่ได้ไปเขียน

กราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6 เพื่อคำนวณหาความต้านทานจากความชันของกราฟ [36]



รูปที่ 3.5 การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน [37]

ความต้านทานสัมผัสมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า โดยให้ A คือพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า ดังนั้นค่าความต้านทานสัมผัสจะเท่ากับค่าความต้านทานคูณกับพื้นที่ผิวสัมผัสโดยวัดความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัดโดยไม่มีชิ้นงาน กำหนดค่าความต้านทานสัมผัสเท่ากับ R_1 และวัดค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน กำหนดให้ค่าความต้านทานสัมผัสเท่ากับ R_2 และหาค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR) ได้จากสมการที่ 3.4 และคำนวณค่าการนำไฟฟ้าตามสมการที่ 3.2 และ 3.3

$$ICR = \frac{(R_2 - R_1)}{2} \times A \quad (3.4)$$

โดยที่

ICR = ค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส

R_1 = ค่าความต้านทานเชิงผิวสัมผัสของเครื่องมือวัด (Ωcm^2)

R_2 = ค่าความต้านทานเชิงผิวสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (Ωcm^2)

3.3.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D570-98 [38]

การวัดค่าการดูดซึมน้ำใช้ชิ้นงานที่มีขนาด ยาว 76.2 มิลลิเมตร กว้าง 25.4 มิลลิเมตร และสูง 3 มิลลิเมตร เมื่อเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดที่ต้องการแล้ว นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดน้ำหนักแห้ง (Dry weight) และนำชิ้นงานไปแช่น้ำกลั่นจนท่วมชิ้นงานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำผ้าฝ้ายแห้งมาซับน้ำส่วนที่เกินออกจากชิ้นงาน และนำไปชั่งน้ำหนักเปียก (Wet weight) ซึ่งร้อยละการดูดซึมน้ำ (%Water absorption) จะคำนวณจากสมการที่ 3.5

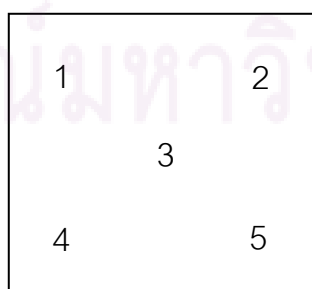
$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \quad (3.5)$$

3.3.9 การทดสอบค่าความแข็งแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM D790-03 [39]

การทดสอบค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) จะทำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีขนาด ยาว 120 มิลลิเมตร กว้าง 10 มิลลิเมตร และสูง 3 มิลลิเมตร โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 13.89 มิลลิเมตรต่อนาที ช่วงความยาว (Span length) 50 มิลลิเมตร ทำการทดสอบซ้ำ 5 ชิ้นงาน บันทึกผล และรายงานค่าเป็นค่าความแข็งแรงดัด

3.3.10 การทดสอบสมบัติความแข็งของชิ้นงาน ด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D2240-04 [40]

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบความแข็งจะมีขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และหนา 6 มิลลิเมตร โดยหัวทดสอบความแข็งชนิดบี (type B) ใช้หัวทดสอบกดลงบนชิ้นงาน 5 จุด ดังแสดงในรูป 3.7 โดยกดหัวทดสอบลงบนชิ้นงานพร้อมกับเริ่มจับเวลา และจะอ่านค่าความแข็งเมื่อเวลาผ่านไป 5 วินาที รายงานผลเป็นค่าความแข็งดูโรมิเตอร์เฉลี่ย



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งในการวัดค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ของชิ้นงาน

3.3.11 การทดสอบสมบัติของแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนเมื่อใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

จากส่วนผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษานั้น ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดกว้าง 11 เซนติเมตร ยาว 11 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร เพื่อนำไปเจาะร่องให้เกิดช่องทางการไหลของแก๊สได้ เนื่องจากปริมาณของพอลิเอสเทอร์เรซินซึ่งใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะมีปริมาณน้อยมาก ความสามารถในการยึดเกาะกันของส่วนผสมจึงลดลง จึงจะเลือกใช้ส่วนผสมของชิ้นงาน 7PANI และ 5PANI (ผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก, เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 7 (7PANI) และ 5 (5PANI) โดยน้ำหนัก และพอลิเอสเทอร์เรซินร้อยละ 18 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) จากนั้นขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการกดอัด 2 ชั่วโมง และทำให้เย็นด้วยระบบหล่อเย็นหมุนเวียนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปเจาะร่องเพื่อให้เกิดช่องทางการไหลของแก๊ส โดยยึดรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สจากแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ของบริษัท Electrochem, Inc. ดำเนินการเจาะร่องโดยบริษัทสุธิยูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด พบว่ามีเพียงชิ้นงาน 7PANI เท่านั้นที่สามารถเจาะร่องเพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงได้

จากนั้นนำแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนที่ผ่านการเจาะร่องแล้วมาทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ที่มีแพลทินัม 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 เตรียมโดยวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรนด้วยเทคนิคการลอก (decal transfer method) และแผ่นการแพร่ของแก๊สเป็นผ้าคาร์บอนเปรียบเทียบผลกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

ขั้นตอนในการทดสอบประสิทธิภาพมีดังนี้

1. ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน 2 แผ่นและแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร ประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้ยางซิลิโคนบางรองก่อนเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สและยึดแผ่นนำกระแสไฟฟ้าที่ประกบกับหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดทั้งสองด้านเข้าด้วยกันโดยใช้น็อตที่มีฉนวนหุ้ม เพื่อป้องกันการลัดวงจร จากนั้นจึงใช้ประแจปอนด์เพื่อทำการอัดส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โมเมนต์การหมุนที่ 40 ปอนด์แรง-นิ้ว จะได้เซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง [41]

2. ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น เมื่อตรวจสอบสภาพความพร้อมของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง และเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดสอบแล้ว จะทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้กราฟโพรวาไรเซชัน โดยใช้ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน 100 SCCM เท่ากัน ภาวะการให้ความชื้นอิ่มตัว อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส [30]

การวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า

1. ควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและหน่วยให้ความชื้นทั้งสองข้างให้มีค่าอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส
2. เปิดโปรแกรม Frequency response analyzer หรือ FRA
3. ตั้งค่าการทดสอบ โดยจะทำการทดสอบที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.8 โวลต์ และค่าความถี่ในช่วง 50 มิลลิเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์
4. เริ่มการวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า
5. เมื่อวิเคราะห์เสร็จแล้วจึงทำการบันทึกค่า
6. ทำการวิเคราะห์ซ้ำประมาณ 3 รอบ
7. ทำการคำนวณผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความต้านทานต่าง ๆ ของระบบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติของแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า เพื่อช่วยให้แผ่นคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยใช้ผงคาร์บอน พอลิอะนิลีน ผสมกับพอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารยึดเกาะ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของแผ่นคอมพอสิตเพื่อใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์

4.1 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณคาร์บอนที่เหมาะสม

ในการผสมสารช่วยยึดเกาะ คือ พอลิเอสเตอร์เรซิน กับผงคาร์บอน 3 ชนิด คือ ผงคาร์บอนชนิดบีดีเอช (BDH) ผงแปรงถ่าน (CB) และผงคาร์บอนชนิดอาร์จีเอ็น (RGN) พบว่า ผงคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดสามารถรวมตัวกับพอลิเอสเตอร์เรซินได้สูงสุดถึงร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก โดยมีการเติมสไตรีนมอนอเมอร์ลงไปเป็นตัวทำละลายพอลิเอสเตอร์เรซินในปริมาณ 20 มิลลิลิตร และสามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ โดยขึ้นงานสามารถคงรูปและแข็งตัวได้ เมื่อปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ขึ้นงานที่ขึ้นรูปได้จะมีความร่วน ความสามารถในการยึดเกาะกันต่ำ เนื่องจากพอลิเอสเตอร์เรซินมีปริมาณที่น้อยเกินไป ดังนั้นจึงทำการขึ้นรูปคาร์บอนคอมพอสิตที่ภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลต่อไป

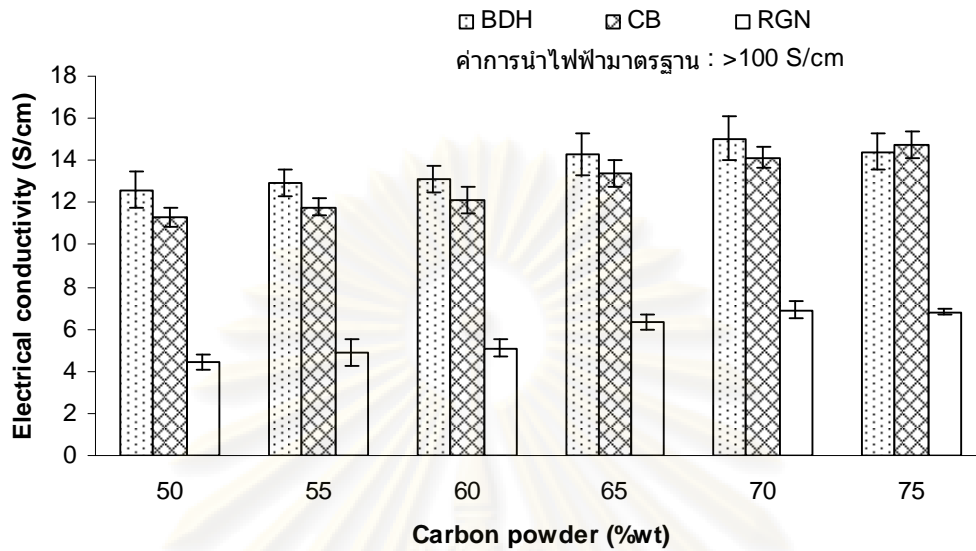
4.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane)

เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตมาทดสอบค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนตามมาตรฐาน ASTM C611-98 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อปริมาณคาร์บอนในชิ้นงานมีค่าร้อยละ 50-75 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานที่ใช้ผงคาร์บอนชนิด BDH และ ผงแปรงถ่าน (CB) จะมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกันประมาณ 11-15 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร โดยที่ปริมาณผงแปรงถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบสูงใกล้เคียงกับ BDH (14.8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) เนื่องจาก ผงคาร์บอนชนิด BDH มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูง (15.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ส่วนผงแปรงถ่าน คือผงที่ได้จากการกลิ้งขั้วอิเล็กโทรดหรือแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ ซึ่งผ่านการปรับสภาพแล้ว จึงมีค่าการนำไฟฟ้าสูง

ด้วย (13.6 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานที่ใช้ผงคาร์บอนชนิด RGN มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 4-7 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เนื่องจาก ผงคาร์บอนชนิด RGN มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 82.84 มีค่าการนำไฟฟ้า 3.9 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ชิ้นงานที่เตรียมได้จึงมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่า เมื่อพิจารณาผงคาร์บอนแต่ละชนิดพบว่า เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นผลชัดเจนในชิ้นงานที่ใช้ผงแปรงถ่าน และ ผงคาร์บอนชนิด BDH และ RGN ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก (ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก) เนื่องจากเมื่อปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณสารนำไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงข่ายการนำไฟฟ้าหรือโครงข่ายการซึมผ่าน (Percolation network) ของอนุภาคคาร์บอนในพอลิเมอร์เมทริกซ์อย่างต่อเนื่อง โครงข่ายการซึมผ่านนี้ประกอบด้วยสายโซ่ของอนุภาคนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน เพื่อให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนเกิดได้ง่าย อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ภายในโครงร่างของคาร์บอนคอมพอสิตได้ดีขึ้น โดยทั่วไปปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าในคาร์บอนคอมพอสิต ได้แก่ การกระจายตัวของผงคาร์บอนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ความสามารถในการรวมตัวและเกิดเป็นของผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture) กับเรซิน [42]

ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hui และคณะ [26] ซึ่งเตรียมแผ่นคอมพอสิตจากผงแกรไฟต์ธรรมชาติโดยใช้พีนอลิกเรซินเป็นสารยึดเกาะ เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65 เป็นร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้นจาก 25.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เป็น 96.2 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ คือ แกรไฟต์มีความบริสุทธิ์มากกว่า (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9) ค่าการนำไฟฟ้าจึงสูงกว่า (ชิ้นงานคอมพอสิตจากผงแปรงถ่านปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก มีค่าการนำไฟฟ้า 14.8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)

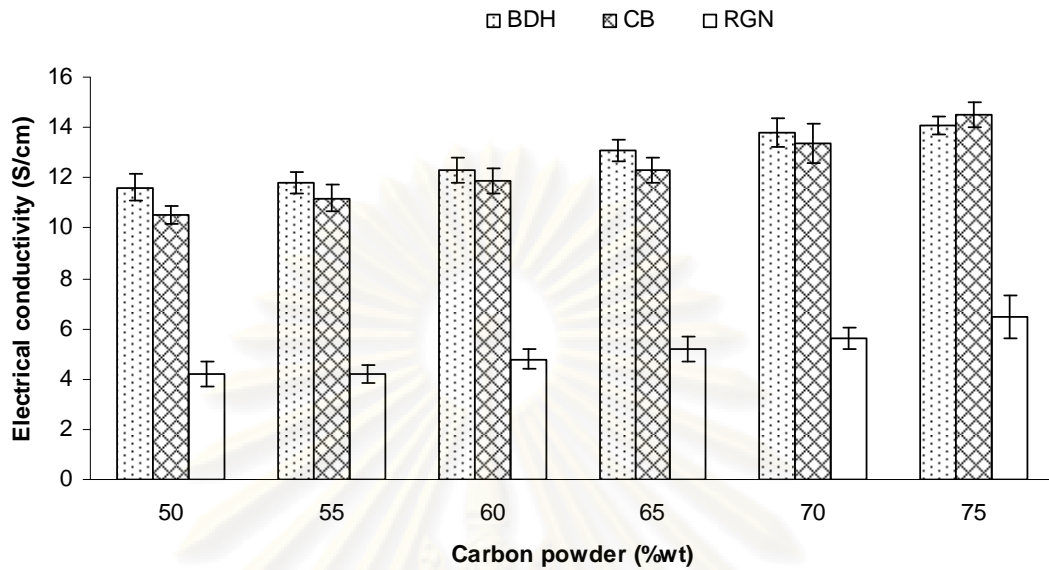
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ

4.1.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane)

เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตมาทดสอบค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50-75 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยชิ้นงานคอมพอสิตที่ใช้ BDH และผงแปรถ่านจะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณคาร์บอนเป็นร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสาเหตุเดียวกับค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน โดยผงแปรถ่านมีค่าการนำไฟฟ้า 14.1 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ RGN จะมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (รูปที่ 4.1) และในรูปที่ 4.2 พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน



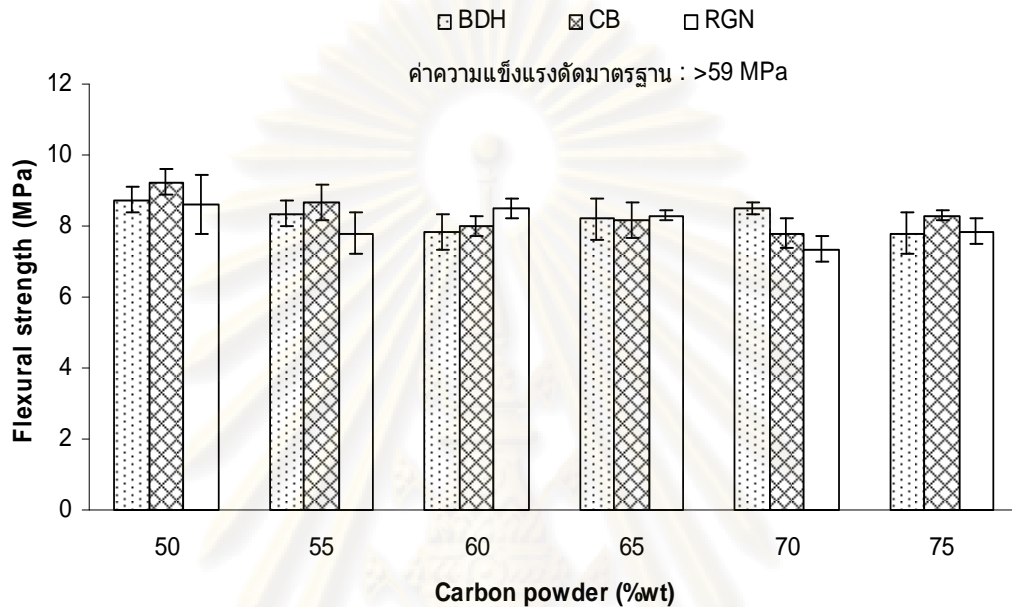
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ

4.1.3 สมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมจากคาร์บอนชนิดต่างๆ จะศึกษาจากค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D790-03 และค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี (Durometer hardness type B) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2240—4 ผลของสมบัติเชิงกลแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

จากรูปที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานที่ใช้ผงคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด คือ ชนิด BDH ผงแปร่งถ่านและ RGN จะมีค่าความแข็งแรงดัดใกล้เคียงกัน โดยชิ้นงานที่ใช้ผงแปร่งถ่านจะมีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุดเท่ากับ 9.2 เมกกะพาสคัลที่ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้ BDH มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุดเท่ากับ 8.75 เมกกะพาสคัลที่ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะมีค่าความแข็งแรงดัดลดลงเล็กน้อย เนื่องจากภาวะของการยึดติดระหว่างผงคาร์บอนและเรซินไม่ทั่วถึงและการยึดเหนี่ยวน้อยลงเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hui และคณะ [26] เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65 เป็นร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดัดจะมีค่าลดลงจาก 46.2 เมกกะพาสคัลเป็น 20.2 เมกกะพาสคัล ในงานวิจัยของ Hui และคณะมีวิธีการเตรียมชิ้นงานคอมพอสิตที่ต่างจากงานวิจัยนี้ คือ ในขั้นตอนการผสมจะใช้เครื่องนวด หลังจากนั้นนำส่วนผสมไป

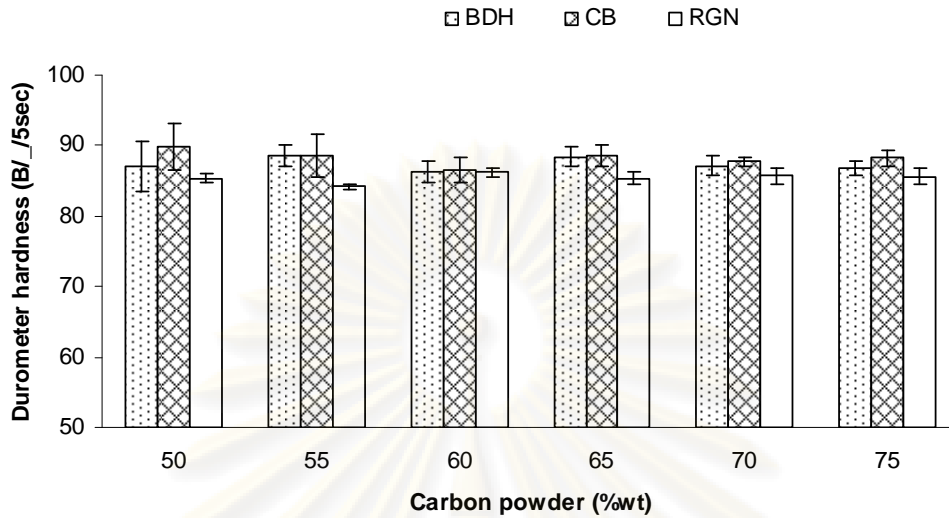
อบแห้งแล้วบดละเอียดก่อน จึงนำไปอัดขึ้นรูป ซึ่งชิ้นงานที่เตรียมได้จากงานวิจัยของ Hui และคณะ ส่วนผสมจะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้จึงมีค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ

ผลจากการทดสอบค่าความแข็งแรงดัดดูโรมิเตอร์ชนิดบีแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า ชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ผงคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดคือ BDH ผงแปร่งถ่าน และ RGN มีค่าการความแข็งแรงดัดดูโรมิเตอร์ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง B/ 84.2-89.8/ 5sec นอกจากนี้ เมื่อปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดัดดูโรมิเตอร์ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะมีการเติมสไตรีนมอนอเมอร์ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายเรซินเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานสไตรีนมอนอเมอร์อาจยังระเหยออกจากชิ้นงานไม่หมด ทราบได้จาก หลังการขึ้นรูปชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานยังมีความชื้นอยู่บ้าง จึงนำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยสไตรีนมอนอเมอร์ ทำให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน ความแข็งแรงของชิ้นงานจึงลดลง

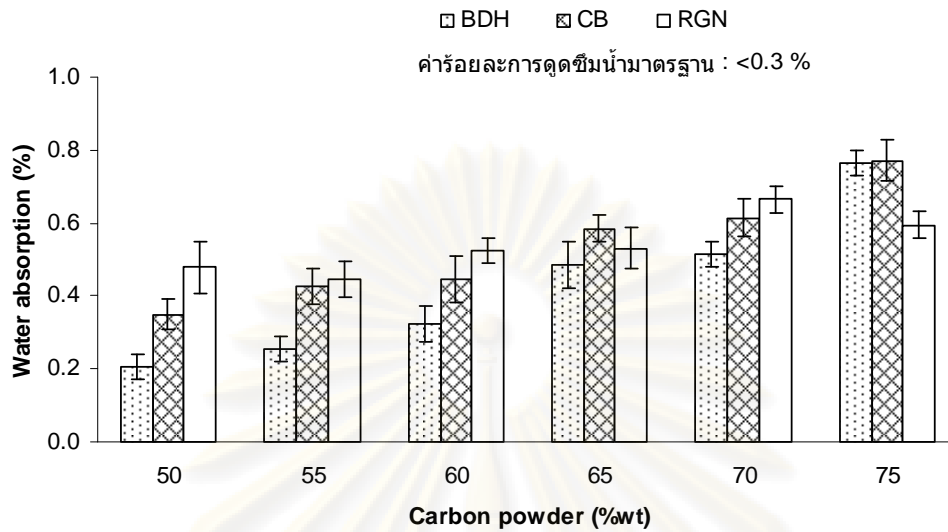
ในการนำแผ่นคอมพอสิตไปใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว จำเป็นต้องมีการเจาะร่องภายในแผ่นเพื่อให้เกิดช่องทางการไหลของแก๊ส ดังนั้นแผ่นคอมพอสิตที่ได้ไม่ควรมีความแข็งแรงมากจนเกินไป อย่างไรก็ตาม เกณฑ์มาตรฐานค่าความแข็งแรงของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วยังไม่มีกรายงานอ้างอิงค่า



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ

4.1.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

จากการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D570-98 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า ที่ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่ใช้ผงคาร์บอนชนิด RGN จะมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้ผงคาร์บอนชนิด BDH และผงแปรงถ่าน และที่ปริมาณคาร์บอนเป็นร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่ใช้ผงแปรงถ่านมีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด โดยแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด มีค่าการดูดซึมน้ำไม่ผ่านเกณฑ์ค่าเป้าหมายซึ่งควรมีร้อยละของการดูดซึมนำน้อยกว่า 0.3 [4] ยกเว้นชิ้นงานที่เตรียมโดยคาร์บอนชนิด BDH ที่ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.2 ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนที่มีเรซินจะลดลง ทำให้การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของผงคาร์บอนและเรซินทำได้ยากและยังมีการเติมโมโนสไตรีนลงไปเพื่อเป็นตัวทำลายเรซิน แผ่นคอมพอสิตที่เตรียมได้จะสังเกตว่ามีความร่วนบริเวณขอบและการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อนำไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ น้ำจึงซึมเข้าไปตามขอบของชิ้นงาน ดังนั้นชิ้นงานคอมพอสิตจากคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 50-55 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการดูดซึมนำน้อยกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

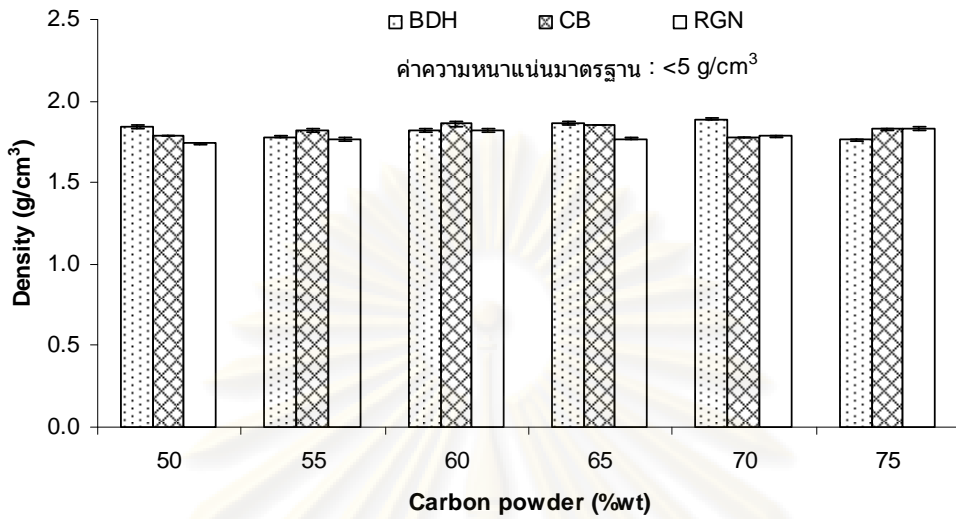


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ

4.1.5 ความหนาแน่น

การศึกษาผลของชนิดคาร์บอนที่มีต่อความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า ชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้คาร์บอนทั้ง 3 ชนิด คือ BDH, RGN และ ผงแปรถ่านจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.74-1.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และปริมาณ ผงคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จาก คาร์บอน 3 ชนิดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงพลังงาน สหรัฐอเมริกา [3] ที่ระบุว่า ความหนาแน่นของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมพอสิตควรมีความหนาแน่นไม่เกิน 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงคาร์บอนชนิดต่างๆ

สรุปโดยรวมจากการศึกษาผลของชนิดคาร์บอน พบว่า ชิ้นงานที่เตรียมจากคาร์บอนชนิด BDH และผงแปร่งถ่านมีสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงคาร์บอนชนิด RGN ส่วนสมบัติเชิงกล ชิ้นงานที่เตรียมจากคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน และทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมได้ ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ดังนั้น จึงเลือกใช้ผงแปร่งถ่านที่ปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ไปทำการศึกษาต่อไป เนื่องจากมีราคาถูกกว่าคาร์บอนชนิด BDH

4.2 การศึกษาผลของการปรับสภาพคาร์บอน

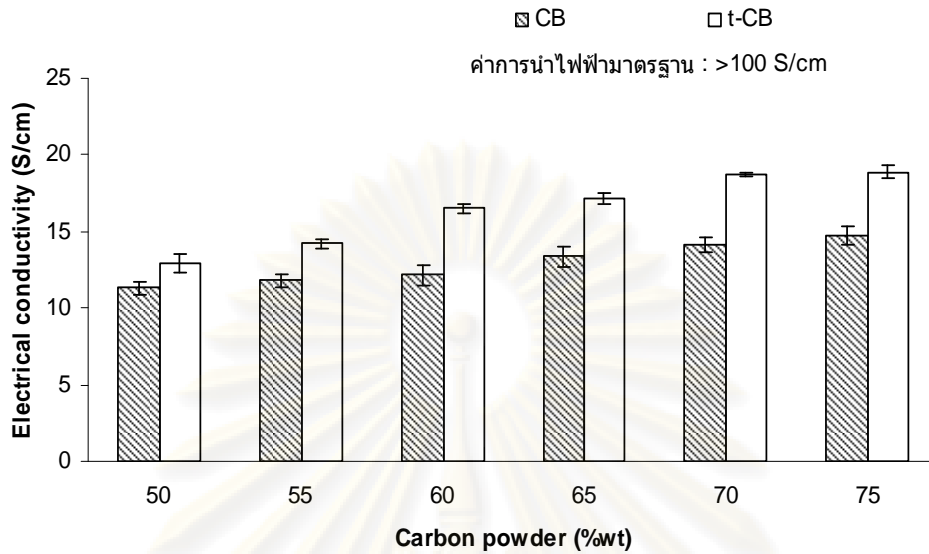
ในการพิจารณาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาเพื่อการใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนั้น ในงานวิจัยจะพิจารณาจากสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตเป็นสำคัญก่อนสมบัติเชิงกล ส่วนผสมใดที่ให้ค่าการนำไฟฟ้ามาก จะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ดี ช่วยลดค่าความต้านทานโอห์มมิก (Ohmic resistance) ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น จากการศึกษาผลของชนิดคาร์บอนในหัวข้อที่ 4.1 พบว่า ชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ผงคาร์บอน BDH และผงแปร่งถ่านจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ผงแปร่งถ่านยังมีราคาถูกกว่าผงคาร์บอนชนิด BDH จึงเลือกผงแปร่งถ่านมาศึกษาผลของการปรับสภาพคาร์บอนและปริมาณที่เหมาะสมของผง

แปลงถ่านในการขึ้นรูปเป็นแผ่นคาร์บอนคอมพอสิต โดยใช้ภาวะในการขึ้นรูปความดัน 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยผงแปลงถ่านที่ผ่านการปรับสภาพ จะมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 21.2 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และผงแปลงถ่านที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 16.7 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (ค่าการนำไฟฟ้างดงกล่าววัดจากผงแปลงถ่านที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพนำมาอัดเป็นก้อนโดยไม่ใช้เรซินเป็นสารยึดเกาะ แล้ววัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน)

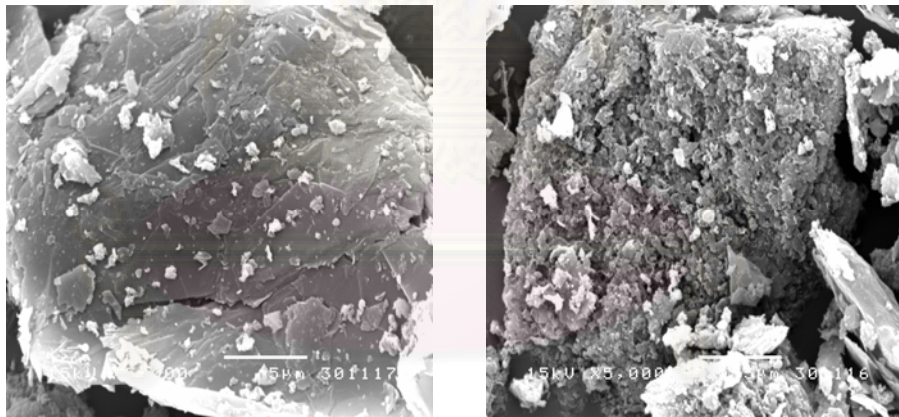
4.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane)

เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตมาทดสอบค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ โดยผงแปลงถ่านที่มีการปรับสภาพจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าที่ไม่มีการปรับสภาพ และมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณผงแปลงถ่านที่ผ่านการปรับสภาพร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก มีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน 18.9 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากการปรับสภาพของผงแปลงถ่านด้วยกรด ทำให้ผงแปลงถ่านมีความเป็นรูพรุนสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8 แต่ละอุนภาคของผงแปลงถ่านสัมผัสกันได้มากขึ้น มีการเชื่อมโยงโครงข่ายการนำไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ค่าการนำไฟฟ้าจึงสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dhakate และคณะ [35] พบว่า แผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากแกรไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 120 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากการปรับสภาพของผงแกรไฟต์ด้วยกรด ทำให้แกรไฟต์มีความเป็นรูพรุนสูงขึ้น ทำให้อุนภาคแกรไฟต์เข้าใกล้ชิดกันได้ดี ค่าการนำไฟฟ้าจึงสูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแปรงถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB)



ก)

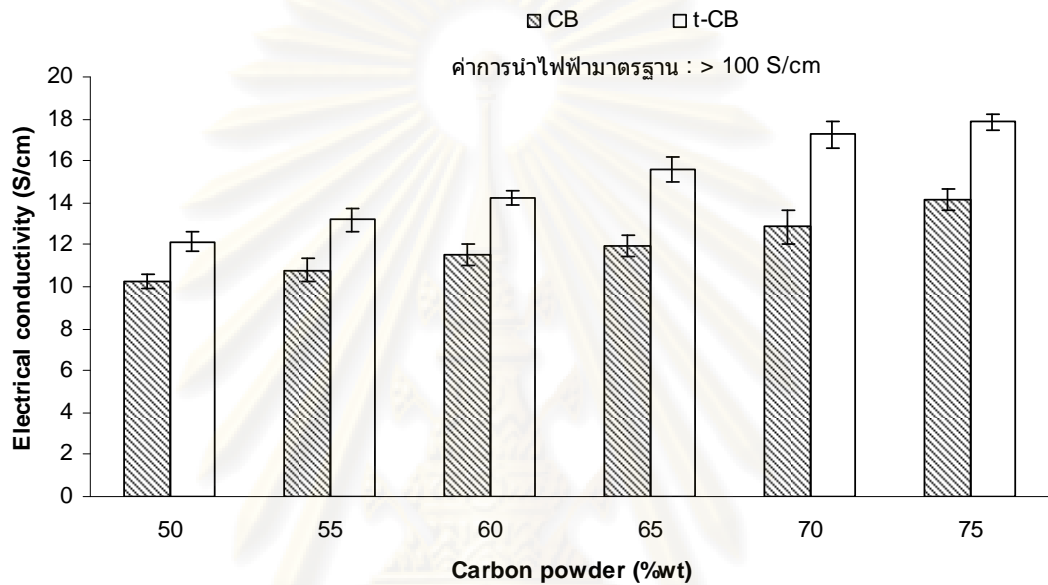
ข)

รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผงแปรงถ่านที่กำลังขยาย 5,000 เท่า
ก) ผงแปรงถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ และ ข) ผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพด้วยกรด

4.2.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane)

เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมโพสิตมาทดสอบค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อปริมาณผงแปรงถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพและที่ปรับสภาพมีปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามลำดับโดยชิ้นงานที่เตรียมจากผงแปรงถ่านที่ผ่านการปรับ

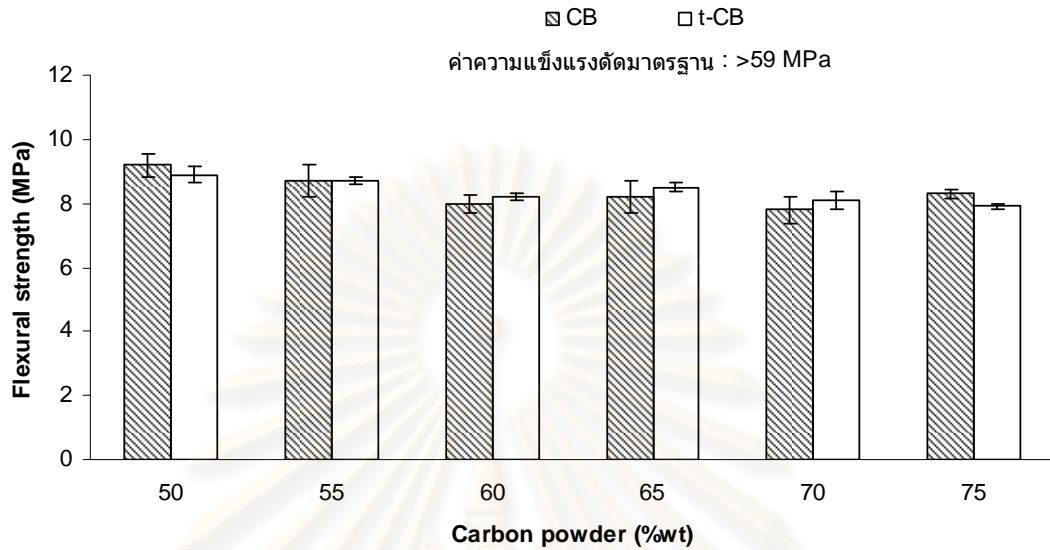
สภาพด้วยกรดมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงแป้งถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ โดยชิ้นงานที่เตรียมจากผงแป้งถ่านที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด คือ 17.8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตรที่ปริมาณผงแป้งถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ซึ่งสาเหตุของการที่ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคล้ายคลึงกับในหัวข้อ 4.2.1



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแป้งถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB)

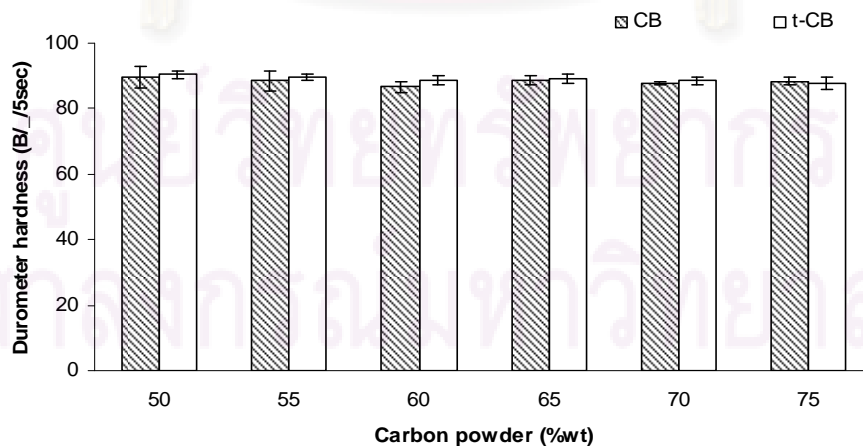
4.2.3 สมบัติเชิงกล

ค่าความแข็งแรงดัดและค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ผงแป้งถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพและที่ปรับสภาพ แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า ชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตจากผงแป้งถ่านที่ปรับสภาพและที่ไม่ได้ปรับสภาพมีค่าความแข็งแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน ในทุกสัดส่วนของปริมาณคาร์บอน โดยมีค่าความแข็งแรงดัดอยู่ในช่วงประมาณ 8.5 ± 0.7 เมกกะพาสคัล โดยชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุดคือ ชิ้นงานที่มีผงแป้งถ่านร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงดัดมีค่า 9.2 ± 0.4 เมกกะพาสคัล เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากภาวะของการยึดติดระหว่างผงคาร์บอนและเรซินลดลง เมื่อปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มขึ้น และรูพรุนที่มากขึ้นของผงแป้งถ่านที่ปรับสภาพทำให้โครงสร้างของชิ้นงานคอมพอสิตเป็นโพรง ความแข็งแรงจึงลดลง [35]



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแปรงถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB)

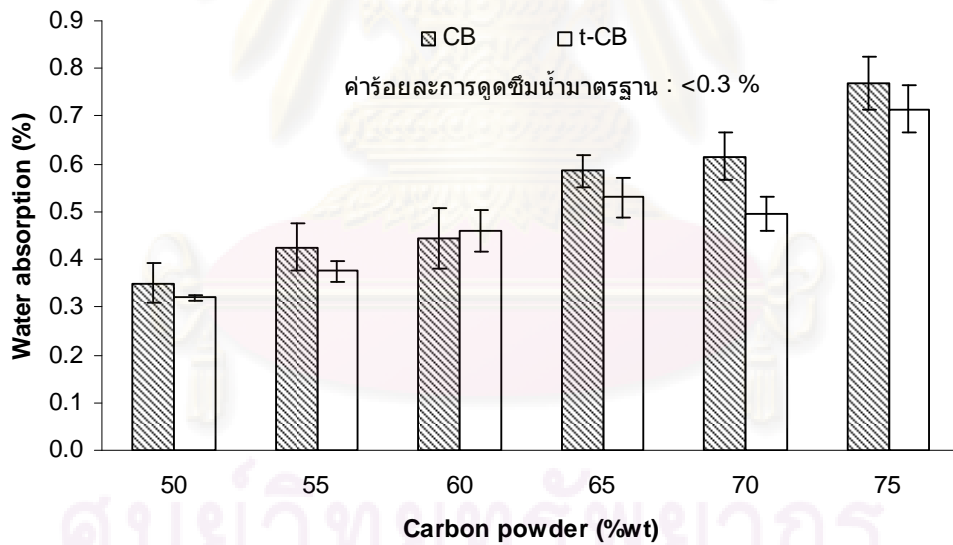
จากรูปที่ 4.11 พบว่า ชี้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมจากผงแปรงถ่านที่ไม่ปรับสภาพมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีใกล้เคียงกับชี้นงานที่เตรียมจากผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพ และเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณผงแปรงถ่านค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ก็ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยจะมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีอยู่ในช่วง $B/87.6 \pm 2.3/5\text{sec}$ ชี้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุดคือชี้นงานที่มีปริมาณผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี $B/90/5\text{sec}$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแปรงถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB)

4.2.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

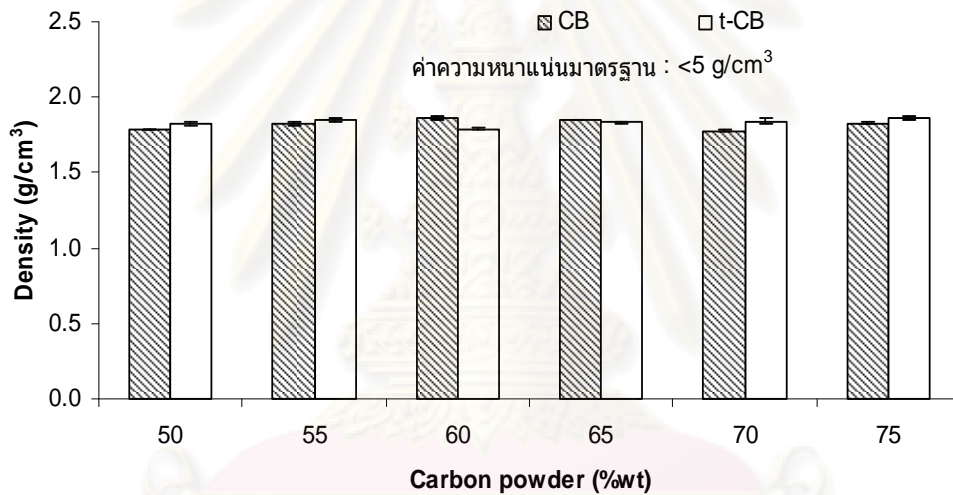
เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ศึกษาผลของการปรับสภาพคาร์บอนมาทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า ชิ้นงานที่เตรียมจากผงแป้งงาที่ไม่ได้ปรับสภาพมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงแป้งงาที่ปรับสภาพ เนื่องจากความเป็นรูพรุนของผงแป้งงาที่ปรับสภาพทำให้อนุภาคของผงแป้งงาเข้าใกล้ชิดกันได้มากขึ้นเมื่อถูกกดอัด จึงไปลดช่องว่างระหว่างอนุภาคลงน้ำจึงดูดซึมเข้าไปได้น้อยกว่า และเมื่อปริมาณของผงแป้งงาเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปริมาณผงแป้งงามากขึ้น รูพรุนมากขึ้น น้ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในรูพรุนเหล่านั้นได้ ค่าการดูดซึมน้ำจึงเพิ่มขึ้น ส่วนชิ้นงานคอมพอสิตที่เตรียมจากผงแป้งงาที่ไม่ปรับสภาพ เมื่อปริมาณผงแป้งงาเพิ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนผสมผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ไม่ดีเท่าที่ควร ชิ้นงานจึงมีความร่วนบริเวณขอบ น้ำจึงสามารถซึมเข้าไปได้ง่าย



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแป้งงาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB)

4.2.5 ความหนาแน่น

การศึกษาค่าผลของการปรับสภาพคาร์บอนที่มีต่อความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมจากผงแปร่งถ่านที่ไม่ปรับสภาพและที่ปรับสภาพมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันในทุกสัดส่วนปริมาณคาร์บอน โดยจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.82 ± 0.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าความเบี่ยงเบนมีค่าน้อยมาก การปรับสภาพผงแปร่งถ่านด้วยกรดจึงไม่มีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของผงคาร์บอนโดยน้ำหนักเมื่อใช้ผงแปร่งถ่านที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CB) และที่ผ่านการปรับสภาพ (t-CB)

จากการศึกษาผลของการปรับสภาพคาร์บอนพบว่า ช่วยให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ส่วนสมบัติเชิงกลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเนื่องจากในงานวิจัยนี้พิจารณาสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสำคัญ จึงเลือกสัดส่วนผงแปร่งถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก มาทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

4.3 การศึกษาสมบัติของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่เตรียมได้

พอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่เตรียมได้จะนำมาศึกษาสมบัติต่างๆ คือ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ค่าการนำไฟฟ้า และ วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน ดังนี้

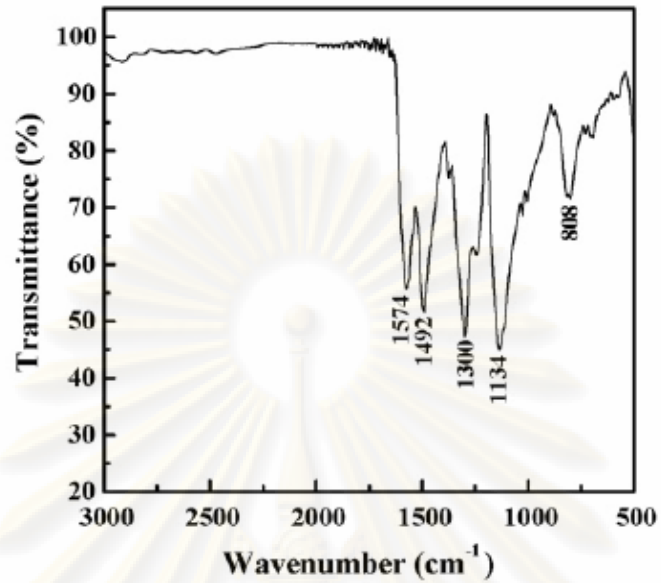
4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

พอลิอะนิลีนจะมีพีคการดูดกลืนแสงที่สำคัญซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิอะนิลีน แสดงดังตารางที่ 4.1 และ FTIR spectra ของพอลิอะนิลีน แสดงดังรูปที่ 4.14

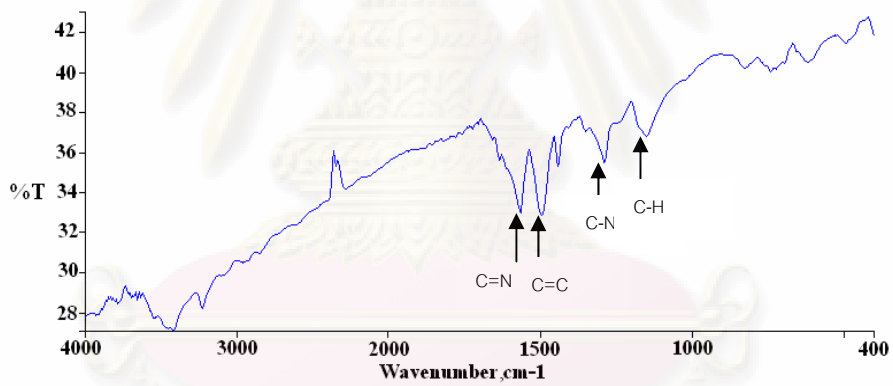
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่สำคัญซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิอะนิลีน [43]

IR band/cm ⁻¹	Structure	Group vibration mode
1500-1600	C=N	quinoeimine stretching
1425-1500	C=C	aromatic stretching
1300-1310	C-N	secondary aryl amine bending
1130-1180	C-H	in-plane bending aromatic

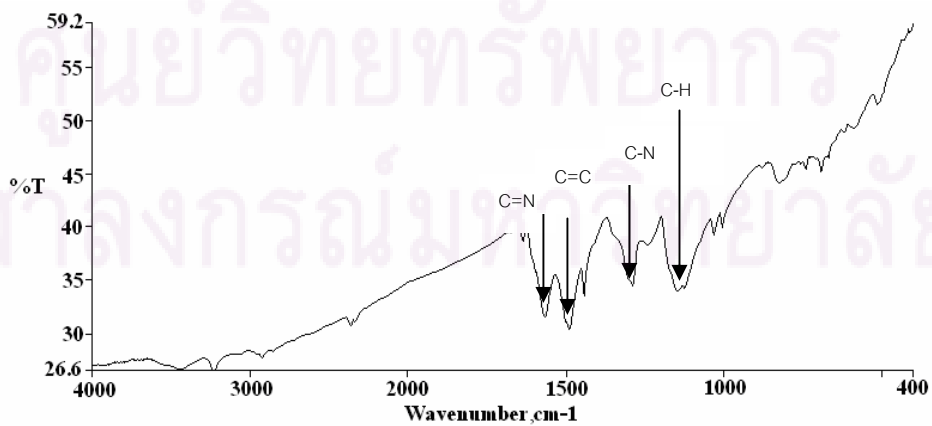
จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่า FTIR spectra ของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์มีลักษณะสเปกตรัมคล้ายคลึงกับที่เคยมีการรายงานว่าเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิอะนิลีนตามตารางที่ 4.1 และงานวิจัยของ He [43] รูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสิ่งที่สังเคราะห์ได้คือพอลิอะนิลีน กล่าวคือ เกิดการสั่นแบบยืดของพันธะ C=N ที่ 1574 cm⁻¹ การยืดของ C=C เกิดที่ 1492 cm⁻¹ แสดงถึงวงอะโรเมติก การสั่นแบบงอของพันธะ C-N ที่ 1300 cm⁻¹ ส่วนการสั่นแบบงอของพันธะ C-H (ในแนวระนาบ) ของพันธะอะโรเมติกที่ 1134 cm⁻¹ และที่ 808 cm⁻¹ เกิดจากการงอของ C-H (ออกนอกระนาบ) ซึ่งใช้บอกรูปแบบการแทนที่วงเบนซีนได้ ส่วนในช่วงต้นของกราฟที่มีลักษณะแตกต่างจากงานวิจัยของ He [43] เนื่องจากสารปนเปื้อนและความชื้นในเครื่องมือวิเคราะห์



รูปที่ 4.14 FTIR spectra ของพอลิอะซิโตนิจากงานวิจัยของ He [43]



รูปที่ 4.15 FTIR spectra ของพอลิอะซิโตนินที่สังเคราะห์ได้



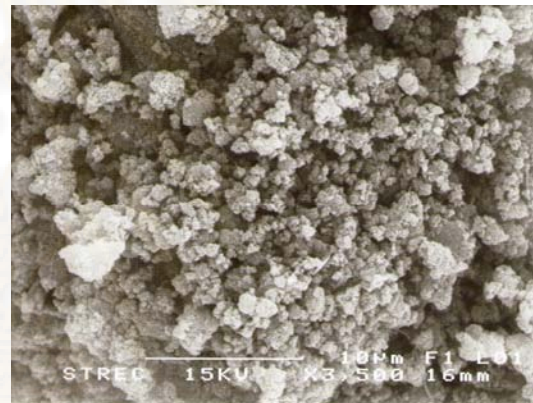
รูปที่ 4.16 FTIR spectra ของพอลิอะซิโตนินนาโนไฟเบอร์ที่สังเคราะห์ได้

4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

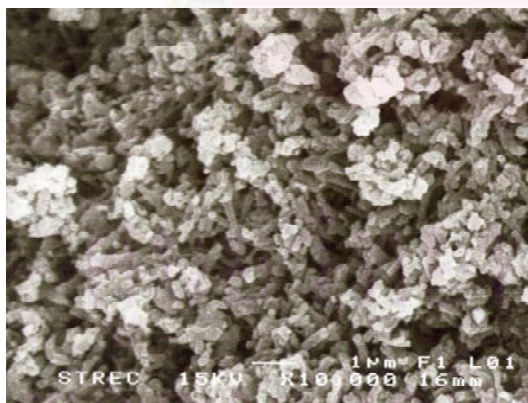
โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า โครงสร้างของพอลิอะนิลีนที่กำลังขยาย 10,000 เท่า รูปที่ 4.17 ก) มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดอนุภาคประมาณ 0.1 ไมโครเมตร เกาะกลุ่มกันอยู่อย่างหนาแน่น ส่วนโครงสร้างของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า รูปที่ 4.17 ค) มีลักษณะเป็นเส้นกลมสั้นๆ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.15 ไมโครเมตร เกาะรวมกลุ่มกันหนาแน่น



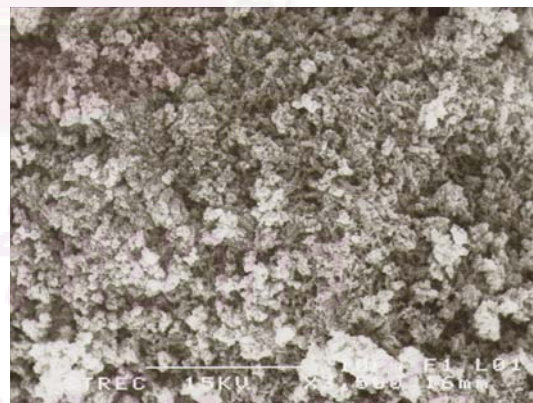
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ :

ก), ข) พอลิอะนิลีน (ที่กำลังขยาย 10,000 และ 3,500 เท่า ตามลำดับ)

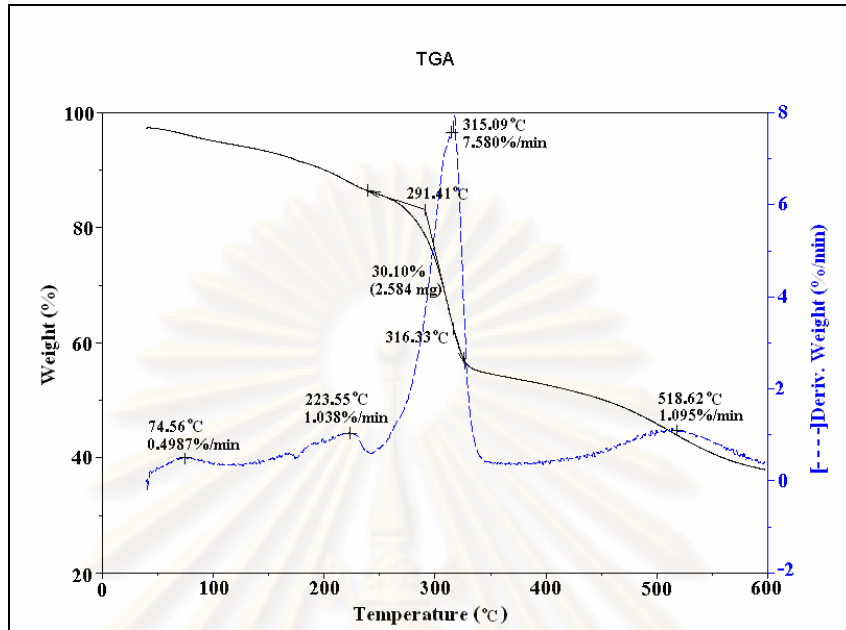
ค), ง) พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ (ที่กำลังขยาย 10,000 และ 3,500 เท่า ตามลำดับ)

4.3.3 การวัดค่าการนำไฟฟ้า

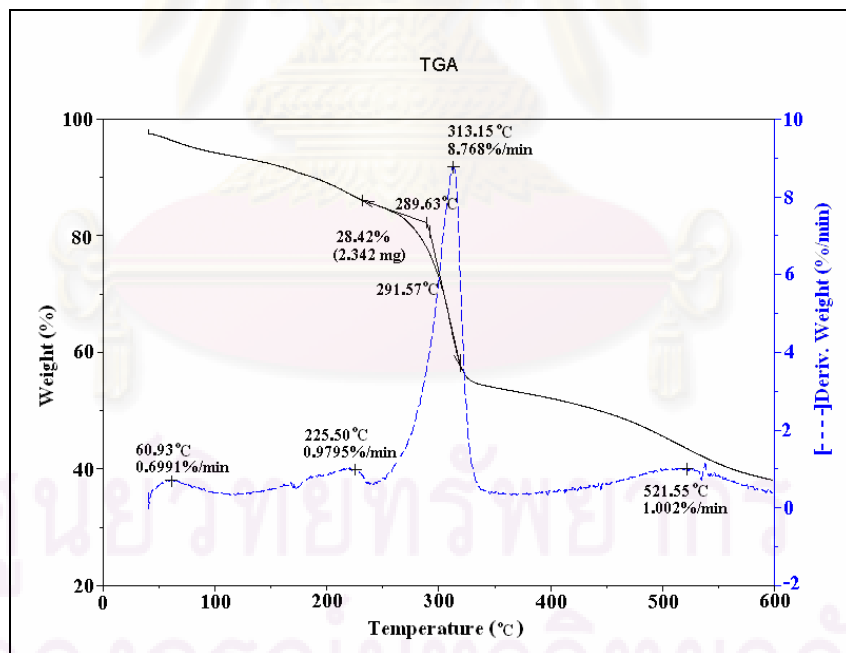
เมื่อนำพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่เตรียมได้มาวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยเทคนิค four point probe โดยนำพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ไปอัดเป็นเม็ดโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ความดัน 30 กิโลพาสคาล เป็นเวลา 5-7 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก 4 แท่ง ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 มิลลิเมตร มากดลงบนเม็ดพอลิอะนิลีน ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าตัวอย่างละ 3 ครั้งแล้วนำมาคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ย พบว่า พอลิอะนิลีนมีค่าการนำไฟฟ้า 1.02 ± 0.12 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ He [43] (ค่าการนำไฟฟ้า 1.27 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) และพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์มีค่าการนำไฟฟ้า 5.48 ± 0.25 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์มีโครงสร้างที่เป็นเส้น โครงข่ายการนำไฟฟ้าจึงเกิดการเชื่อมโยงได้ดี

4.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารในขณะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 4 ช่วง คือ ช่วงแรก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส คาดว่าน่าจะเกิดจากการระเหยของน้ำที่เป็นความชื้นในตัวอย่าง ช่วงที่สอง ที่อุณหภูมิ 200-210 องศาเซลเซียส คาดว่าเกิดจากการสูญเสียกรดไฮโดรคลอริกซึ่งเป็นสารได้ป และช่วงที่สาม ที่อุณหภูมิ 300-320 องศาเซลเซียส คาดว่าเกิดจากการสูญเสียโพลิโกเมอร์ และช่วงที่สี่ ที่อุณหภูมิ 500-520 องศาเซลเซียส คาดว่าเกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิอะนิลีน

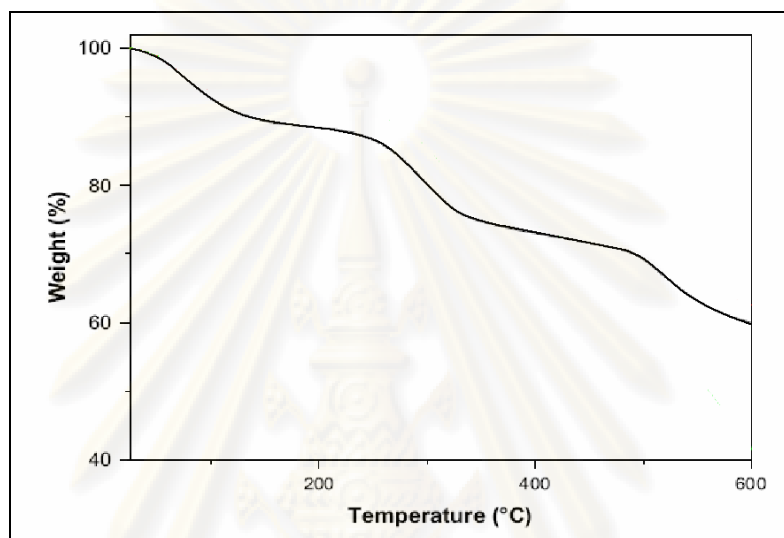


รูปที่ 4.18 TGA thermograms ของพอลิอะครีโลไนลีน



รูปที่ 4.19 TGA thermograms ของพอลิอะครีโลไนลีนนาโนไฟเบอร์

จากการวิเคราะห์ TGA ของพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่สังเคราะห์ได้พบว่า มีลักษณะคล้ายกับที่เคยมีรายงานในงานวิจัยของ Chen และคณะ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 [44] กล่าวคือ น้ำหนักที่สูญหายช่วงแรกเกิดจากการระเหยของน้ำ ต่อมาเป็นช่วงการสลายตัวของสารได้ไป และช่วงสุดท้ายเป็นการสลายตัวของพอลิอะนิลีน อย่างช้าๆ



รูปที่ 4.20 TGA thermograms ของพอลิอะนิลีนจากงานวิจัยของ Chen และคณะ [44]

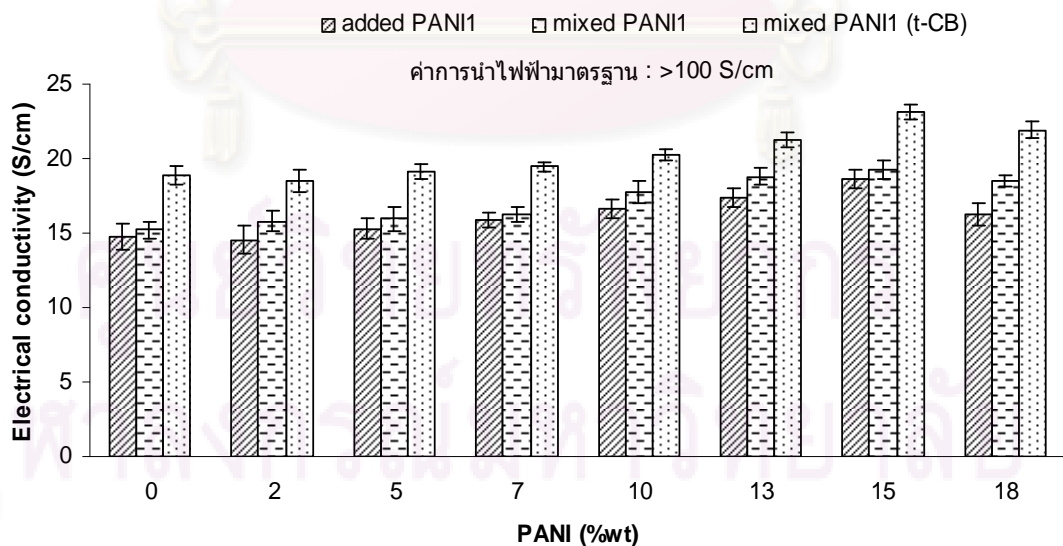
4.4 การศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน

การศึกษาค้นคว้าผลของการเติมพอลิอะนิลีนจะแบ่งวิธีการเตรียมแผ่นคอมพอสิตออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีแรกจะทำการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนก่อน แล้วจึงนำมาผสมกับเรซินและผงแบเรียมที่ไม่ปรับสภาพและที่ปรับสภาพ แล้วจึงนำไปทำการขึ้นรูป โดยจะใช้สัญลักษณ์ว่า “added PANI1” และวิธีที่สอง “added PANI2” โดย 1 แทนพอลิอะนิลีน และ 2 แทนพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ และวิธีที่สองจะเติมผงแบเรียมที่ปรับสภาพลงไปในกระบวนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีน แล้วจึงนำพอลิอะนิลีนที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับผงแบเรียมที่ปรับสภาพไปผสมกับเรซิน (mixed PANI1, 2 และ mixed PANI1, 2 (t-CB)) แล้วจึงนำไปทำการขึ้นรูป โดยเลือกภาวะผงแบเรียมร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก และปริมาณพอลิอะนิลีนเติมในปริมาณที่เปลี่ยนไปโดยแทนที่ในอัตราส่วนที่เป็นเรซิน

4.4.1 การเตรียมแผ่นคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน

4.4.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane)

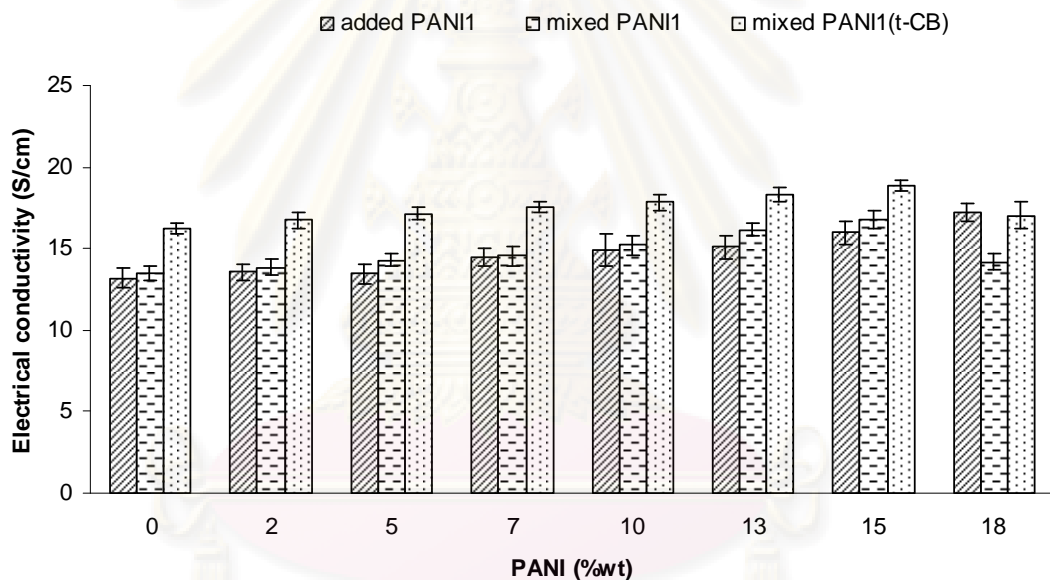
เมื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21 ตามลำดับ พบว่า การเติมพอลิอะนิลีนในผงแบงก์ที่ปรับสภาพ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และมีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด (23.1 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (แผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงแบงก์ที่ปรับสภาพ ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก มีค่าการนำไฟฟ้า 18.9 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) และเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิอะนิลีน ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยชิ้นงาน mixed PANI1 และ mixed PANI1(t-CB) จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงาน added PANI1 เนื่องจากพอลิอะนิลีนที่เติมเข้าไปมีความสามารถในการนำไฟฟ้าไปแทรกอยู่ตามอนุภาคของผงแบงก์ขณะสังเคราะห์ ทำให้โครงข่ายการนำไฟฟ้าเชื่อมต่อกัน การส่งผ่านอิเล็กตรอนเกิดได้ง่าย อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างของคาร์บอนคอมพอสิตได้ดีขึ้น ยกเว้นที่ปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ปริมาณเรซินจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ความสามารถในการช่วยยึดเกาะของเรซินจึงลดลง ชิ้นงานที่เตรียมได้มีความอ่อนเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก

4.4.1.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane)

เมื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่า การเติมพอลิอะนิลีนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งในวิธีการเตรียมแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตทั้ง 3 วิธี ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับในหัวข้อที่ 4.4.1.1 การเตรียมแผ่นคอมพอสิตโดยวิธีการเติมผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพลงไปในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีน (mixed PANI1(t-CB)) จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด โดยมีค่าการนำไฟฟ้า 18.9 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านน้อยกว่าค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนเล็กน้อย



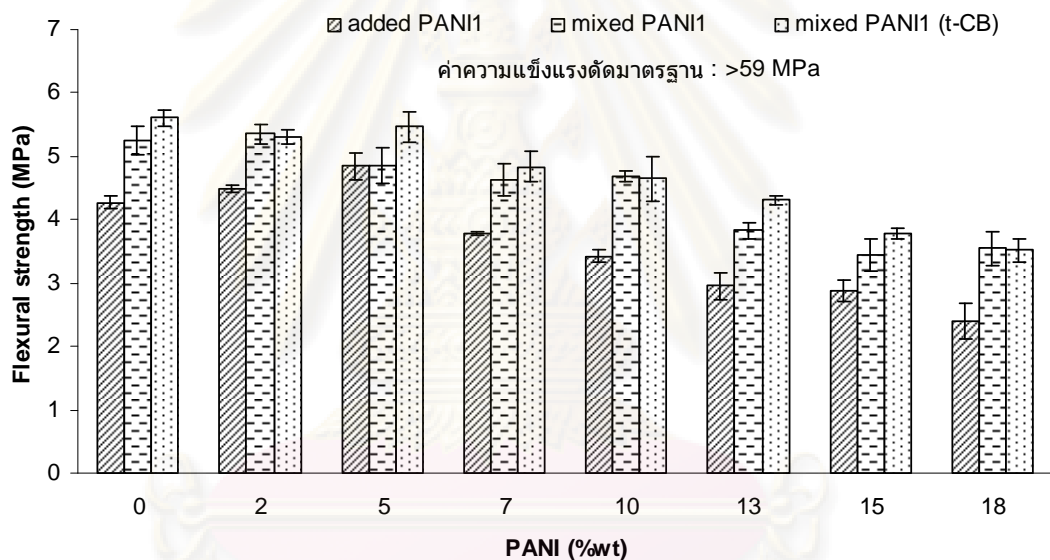
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก

4.4.1.3 สมบัติเชิงกล

ค่าความแข็งแรงดัดและค่าความแข็งดุมโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีน แสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ

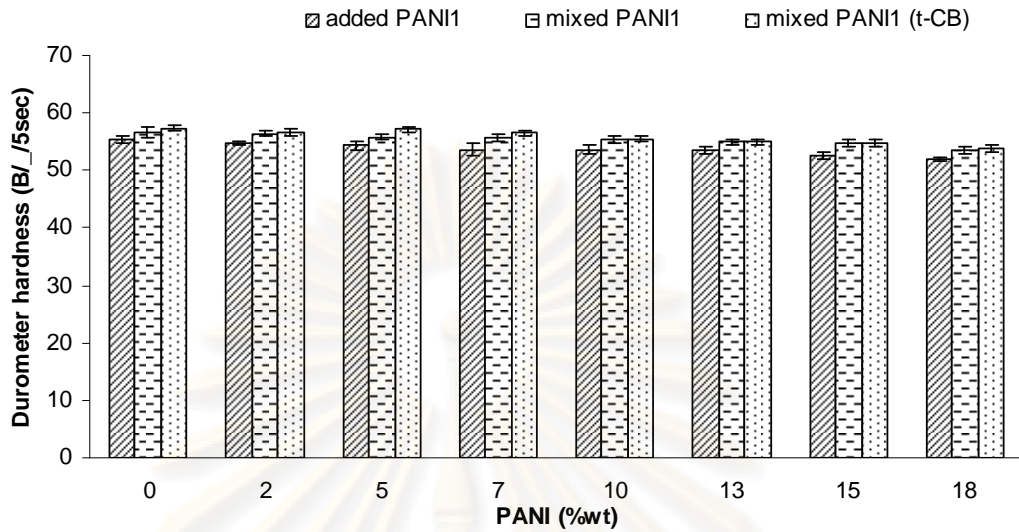
จากรูปที่ 4.23 พบว่า การเติมพอลิอะนิลีนส่งผลให้ความแข็งแรงดัดของชิ้นงานคาร์บอนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ไม่ได้เติม โดยเมื่อปริมาณพอลิ

ลิกะนินเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดัดจะลดลง เนื่องจากความสามารถในการยึดเกาะของผงแปร่ง ถ่านและพอลิอะนินลดลง และชิ้นงานคอมพอสิตที่เตรียมโดยการผสมผงแปร่งถ่านในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิน (mixed PANI1 และ mixed PANI1(t-CB)) มีค่าความแข็งแรงดัดมากกว่า ชิ้นงานที่เติมพอลิอะนินผสมกับผงแปร่งถ่านและเรซิน (added PANI1) เนื่องจากสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่า ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนินอยู่ในช่วง 4 ± 1.6 เมกกะพาสคัล และรูปที่ 4.24 พบว่า เมื่อเติมพอลิอะนิน ชิ้นงานคอมพอสิตมีค่าความแข็งแรงดัดที่ใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง $B/54.6 \pm 2.7/5\text{sec}$



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของพอลิอะนินโดยน้ำหนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

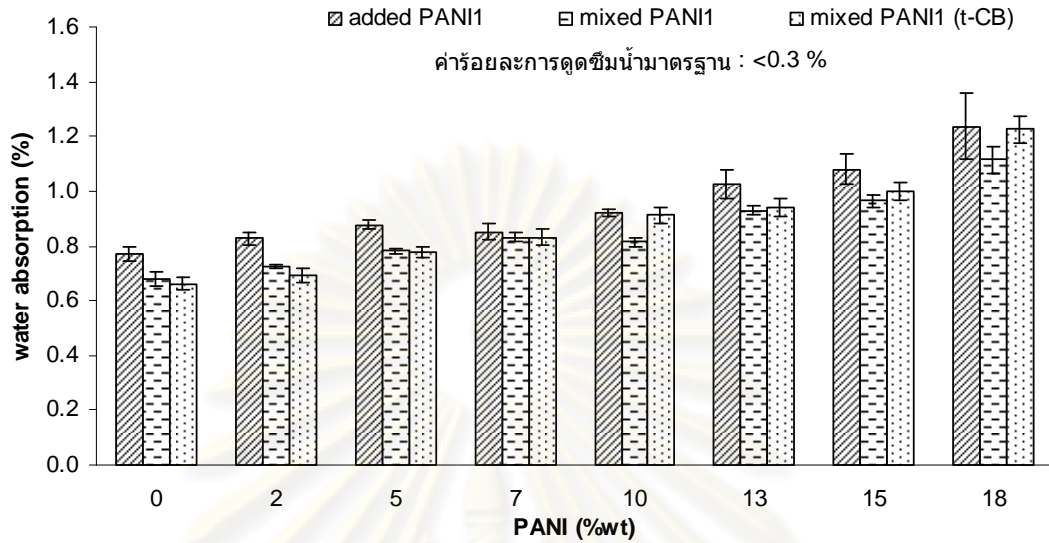


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก

4.4.1.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

เมื่อศึกษาการดูดซึมน้ำของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนที่ได้ แสดงดังรูป 4.25 พบว่า เมื่อปริมาณพอลิอะนิลีนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ในชิ้นงาน added PANI1, mixed PANI1 และ mixed PANI1(t-CB) ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงแรกที่ไม่มีการเติมพอลิอะนิลีนและมีการเติมพอลิอะนิลีนในปริมาณร้อยละ 2-15 โดยน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณของพอลิอะนิลีนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นมาก ทั้งนี้ อาจเนื่องจากที่ปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 18 โดยน้ำหนักมีปริมาณเรซินอยู่เพียงร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเรซินซึ่งเป็นสารช่วยยึดเกาะคาร์บอนลดปริมาณลง ความสามารถในการช่วยยึดเกาะจึงลดลง อนุภาคของผงแบรอนด์และพอลิอะนิลีนจึงยึดเกาะกันไม่ได้ดี น้ำจึงสามารถแทรกซึมเข้าไปในแผ่นคอมพอสิตได้ง่าย

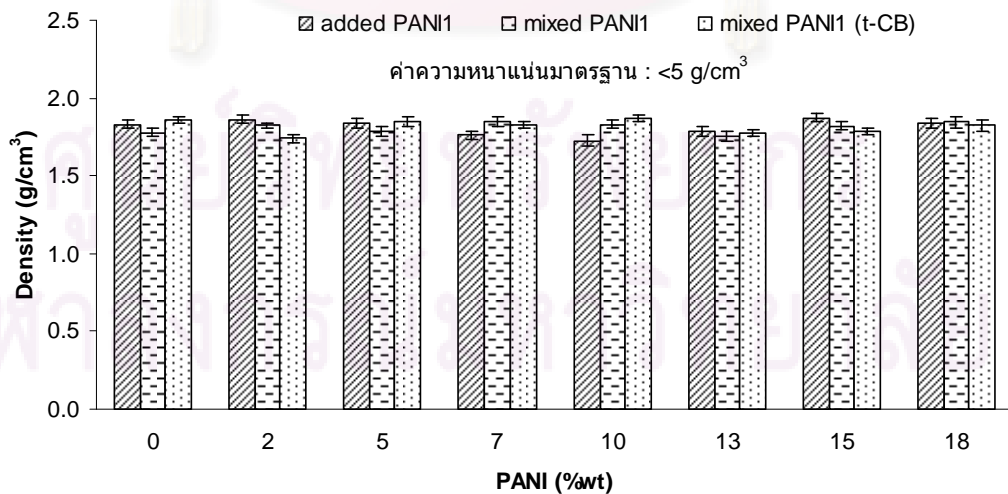
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก

4.4.1.5 ความหนาแน่น

การศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีน added PANI1, mixed PANI1 และ mixed PANI1(t-CB) ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตแสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่า การผสมพอลิอะนิลีนทั้ง added PANI1, mixed PANI1 และ mixed PANI1(t-CB) ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น เนื่องจากชิ้นงานที่มีการเติมพอลิอะนิลีนทั้ง 3 แบบ มีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 1.79 ± 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

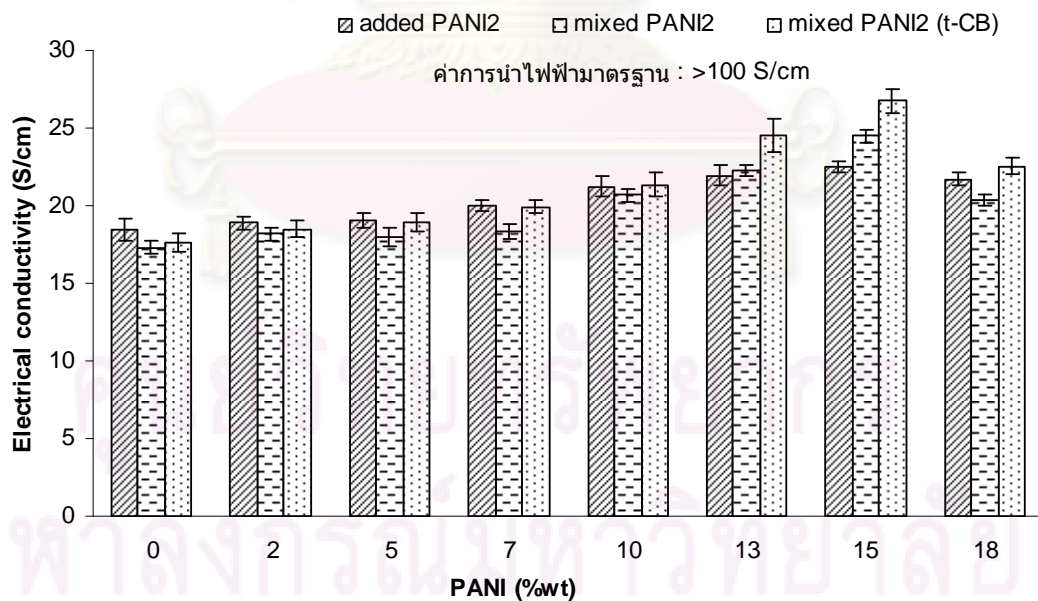


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของพอลิอะนิลีนโดยน้ำหนัก

4.4.2 การเตรียมแผ่นคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์

4.4.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane)

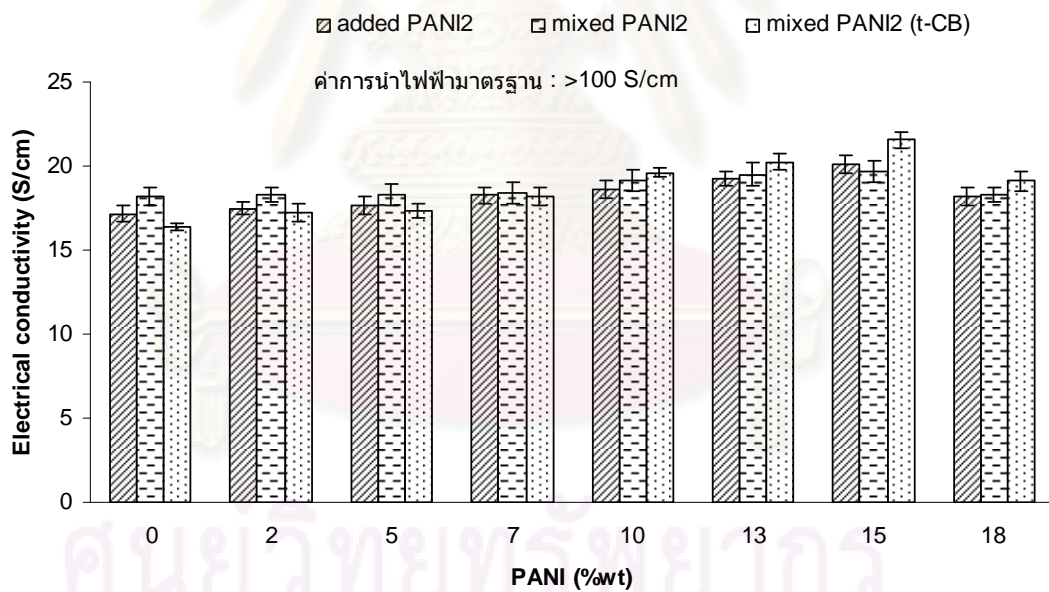
เมื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า ชิ้นงานที่มีการผสมผงแบร่งถ่านที่ปรับสภาพในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ (mixed PANI2 (t-CB)) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า ชิ้นงาน added PANI2 และ mixed PANI2 โดยจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด 26.8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และยังสูงกว่าชิ้นงาน mixed PANI1 (t-CB) ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้า 23.1 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักเท่ากัน เนื่องจากผงแบร่งถ่านที่ปรับสภาพช่วยให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 4.17 ก) และข) ทำให้โครงข่ายการนำไฟฟ้าเชื่อมโยงกันได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jia และคณะ [31] พอลิอะนิลีนที่มีโครงสร้างแบบเส้นใย จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดเนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นเส้น จึงตกตะกอนได้ยาก ส่วนพอลิอะนิลีนที่มีโครงสร้างแบบอนุภาคจะตกตะกอนได้ง่ายกว่า ค่าการนำไฟฟ้าจึงไม่ดี



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก

4.4.2.2 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (through-plane)

เมื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มี การเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.28 พบว่า ชิ้นงาน mixed PANI2 (t-CB) ที่ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 21.55 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดย น้ำหนัก โดยค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านจะต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (26.8 ซีเมนส์ต่อ เซนติเมตร) ในหัวข้อที่ 4.4.2.1 ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนเท่ากันในทุกอัตราส่วน และแนวโน้มของค่า การนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน คือ ที่ ปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 2-15 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณพอลิอะนิลีนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้า ของชิ้นงานคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณพอลิอะนิลีนเป็นร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ค่าการนำ ไฟฟ้าของชิ้นงานคอมพอสิตลดลง เนื่องจากปริมาณเรซินลดลง ความสามารถในการยึดเกาะ ของเรซินจึงลดลง ชิ้นงานคอมพอสิตที่เตรียมได้จึงมีความร่วน ค่าการนำไฟฟ้าจึงไม่ดี

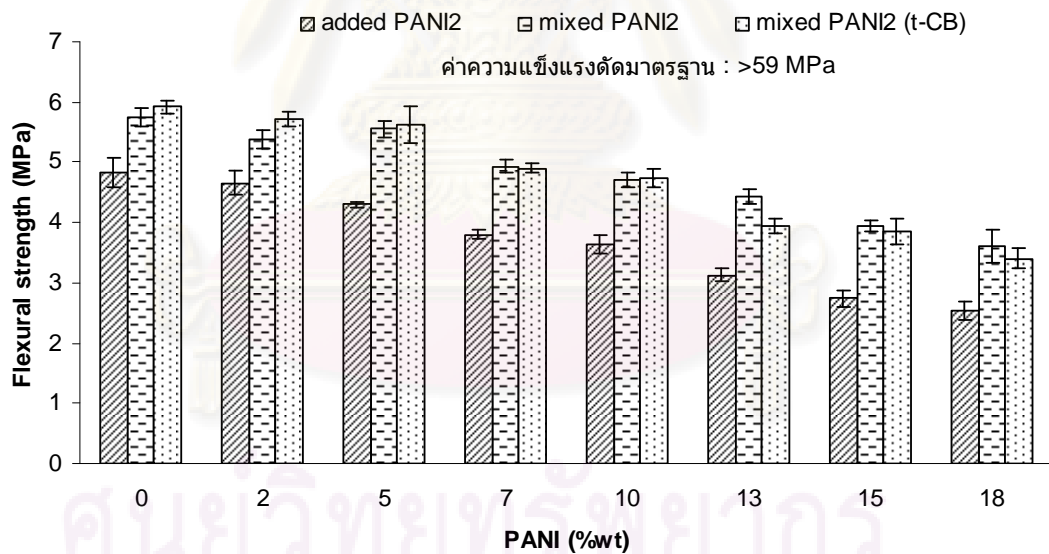


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก

4.4.2.3 สมบัติเชิงกล

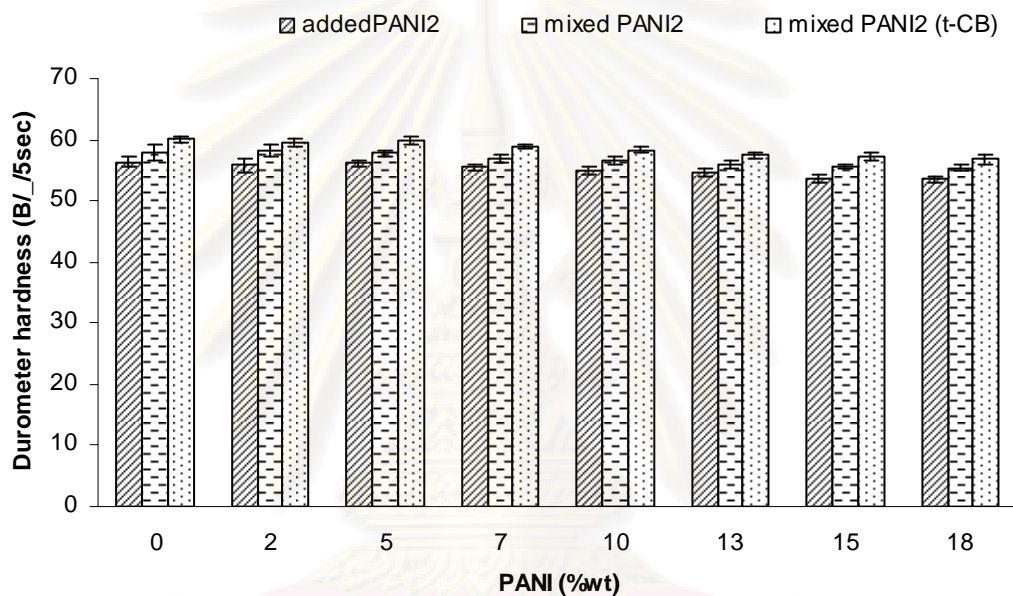
ค่าความแข็งแรงดัดและค่าความแข็งแรงดัดโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนแสดงดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.29 พบว่า การเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ในชิ้นงาน mixed PANI2 และ mixed PANI2 (t-CB) จะมีค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่าชิ้นงาน added PANI2 เนื่องจากการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์และผงแป้งถ่านในชิ้นงาน mixed PANI2 และ mixed PANI2(t-CB) เกิดขึ้นได้ดีกว่า และเมื่อปริมาณพอลิอะนิลีนเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลง โดยมีค่าความแข็งแรงดัดเท่ากับ 2.5, 3.6 และ 3.4 เมกกะพาสคาล ของชิ้นงาน added PANI2, mixed PANI2 และ mixed PANI2 (t-CB) ตามลำดับ ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก จากเดิมที่ไม่มีการเติมพอลิอะนิลีนชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต added PANI2, mixed PANI2 และ mixed PANI2(t-CB) มีค่าความแข็งแรงดัด 4.8, 5.7 และ 5.9 เมกกะพาสคาล ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.30 พบว่า ชีงงานที่มีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์จะมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดปีเรียงตามลำดับจากน้อยไปมากได้ ดังนี้ added PANI2, mixed PANI2 และ mixed PANI2(t-CB) และเมื่อปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์เพิ่มขึ้นค่าความแข็งดูโรมิเตอร์จะลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณของเรซินลดลง ความสามารถในการยึดเกาะจึงลดลงตาม แผ่นคอมพอสิตที่เตรียมได้จึงมีความแข็งลดลง โดยแผ่นคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์อยู่ในช่วง $B/56.8 \pm 3.3/5\text{sec}$ ซึ่งมีค่ามากกว่า

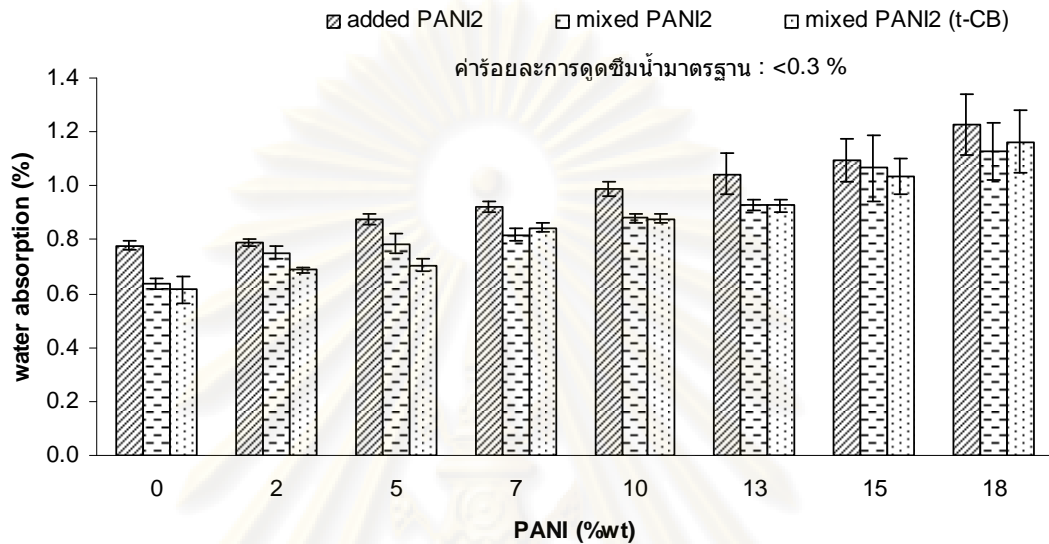


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ โดยน้ำหนัก

4.4.2.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

เมื่อศึกษาอัตราการดูดซึมน้ำของชีงงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่า ชีงงาน added PANI2, mixed PANI2 และ mixed PANI2(t-CB) มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยชีงงาน mixed PANI2(t-CB) จะมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด รองลงมาจะเป็นชีงงาน mixed PANI2 และ added PANI2 ตามลำดับ และเมื่อปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น โดยค่าการดูดซึมน้ำของชีงงานทั้ง 3 ชนิดจะอยู่ในช่วงร้อยละ 0.9 ± 0.3 เนื่องจากปริมาณเรซิน

ลดลง ความสามารถในการยึดเกาะจึงลดลง เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ น้ำจึงสามารถซึมเข้าไปภายในชิ้นงานได้ และชิ้นงาน

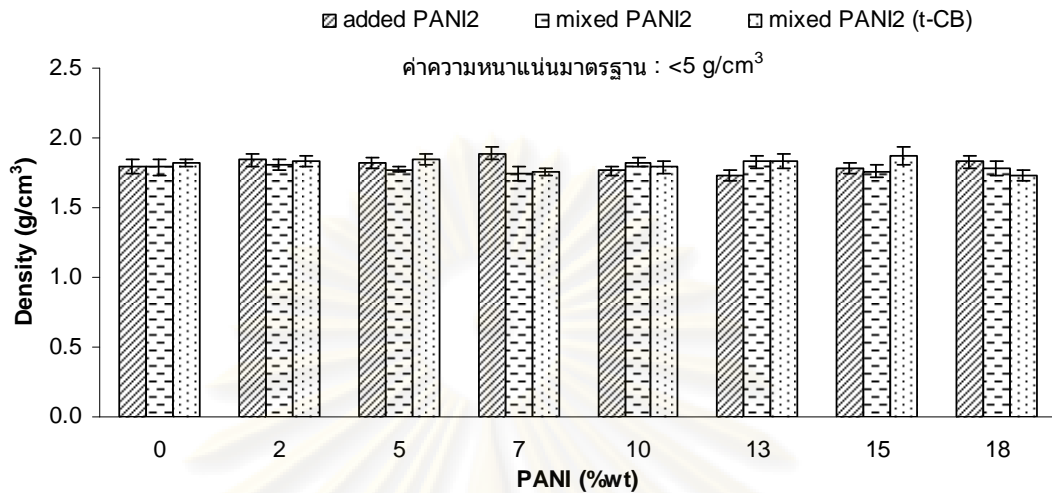


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก

4.4.2.5 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่า ชิ้นงานคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ (added PANI2) มีค่าความหนาแน่นสูงสุด 1.89 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก และชิ้นงานคอมพอสิตที่นำผงแป้งถ่านที่ปรับสภาพเติมลงในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ (mixed PANI2(t-CB)) มีค่าความหนาแน่นสูงสุด คือ 1.88 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ พบว่าชิ้นงานที่เติมพอลิอะนิลีนล้วนจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น และชิ้นงานที่เติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าชิ้นงานที่เติมพอลิอะนิลีน แต่การเติมพอลิอะนิลีนทั้ง 2 ชนิด ทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง ดังนั้นจึงเลือกสัดส่วนที่เติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลต่อไป

4.5 การศึกษาผลของสารเติมแต่ง

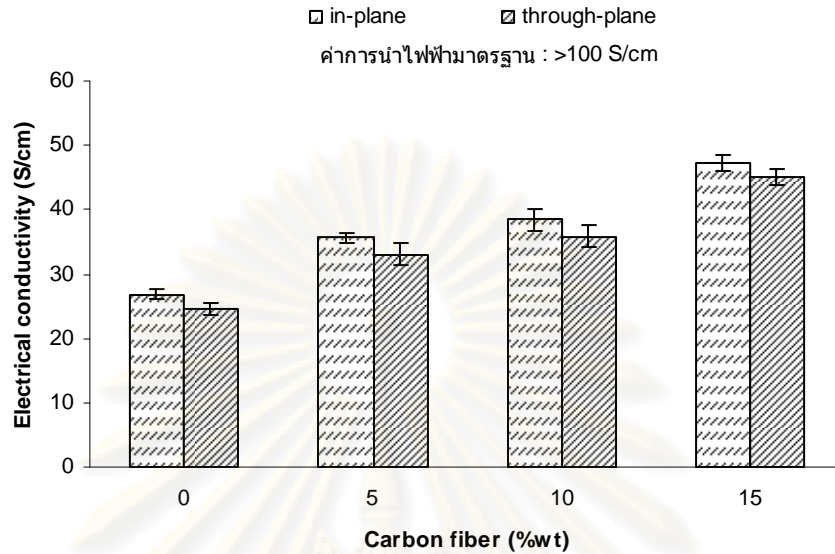
ในการพิจารณาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาเพื่อการใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนั้น จะพิจารณาโดยเน้นที่สมบัติการนำไฟฟ้าเป็นสำคัญ แต่เนื่องจากสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งแรงดัดและค่าการดูดซึมน้ำก็มีความสำคัญด้วย จากผลการทดลองที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้น พบว่า ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความแข็งแรงดัด และร้อยละการดูดซึมน้ำ ยังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก จึงทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ โดยการเติมสารเติมแต่งคือ เส้นใยคาร์บอน โดยเลือกส่วนผสม mixed PANI2(t-CB) คือผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพผสมกับพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ในขั้นตอนการสังเคราะห์ และจึงนำมาผสมกับเรซิน โดยปริมาณของพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงจากหัวข้อที่ 4.4.2.1 และให้มีปริมาณคาร์บอนโดยรวมที่ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

4.5.1 เส้นใยคาร์บอน

การศึกษาปริมาณการเติมเส้นใยคาร์บอน จะทดลองเติมเส้นใยคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยคาร์บอนให้มากขึ้น ชิ้นงานที่ได้ออกมา จะเกิดการบวม เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนปริมาณมากจะไม่ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนผสมอื่น จึงไม่สามารถนำมาทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลได้

4.5.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) และในแนวทะลุผ่าน (through-plane)

เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมเส้นใยคาร์บอนมาทดสอบค่าการนำไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.33 พบว่า เส้นใยคาร์บอนสามารถผสมได้มากที่สุดในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนมากที่สุดเท่ากับ 47.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน 45.1 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยคาร์บอนส่งผลให้เกิดความต่อเนื่องของโครงข่ายการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างของคาร์บอนคอมพอสิตได้ดีขึ้น ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hwang และคณะ [28] พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 300 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เมื่อชิ้นงานเป็นเส้นใยคาร์บอนผสมกับอีพอกซีเรซิน



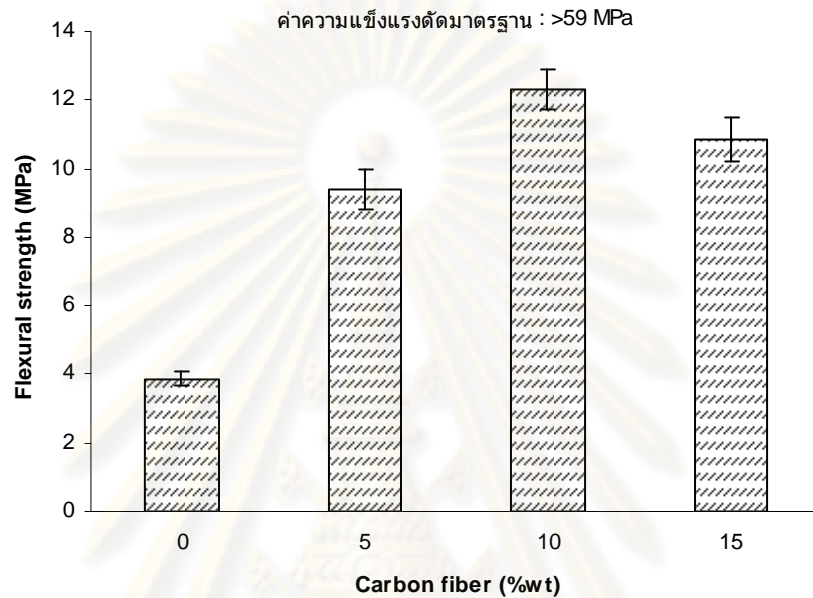
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

4.5.1.2 สมบัติเชิงกล

ค่าความแข็งแรงดัดและค่าความแข็งแรงดัดดิวโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักที่ทำการผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีน และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ

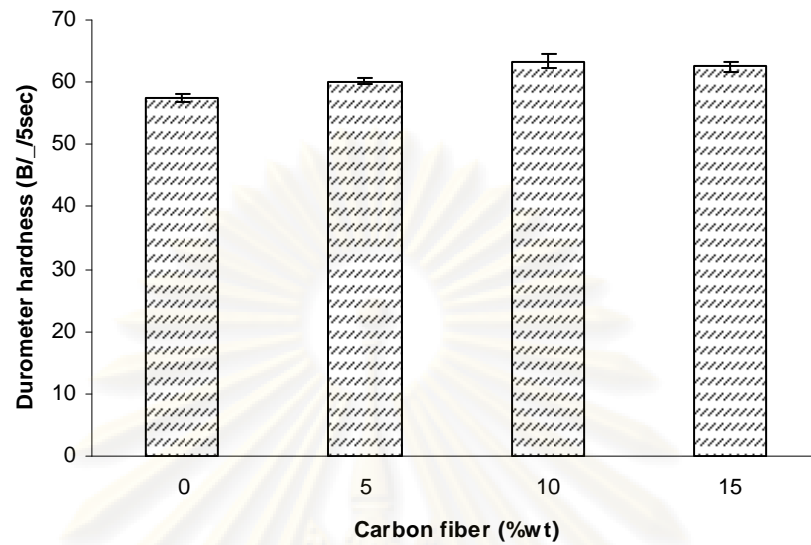
จากรูปที่ 4.34 พบว่า ชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าความแข็งแรงดัดมากกว่าชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ไม่เติมเส้นใยคาร์บอน ที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมเท่ากัน โดยจากรูปที่ 4.29 พบว่าชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงดัดเท่ากับ 3.8 เมกกะพาสคัล ในขณะที่ชิ้นงานที่เติมเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าความแข็งแรงดัดอยู่ในช่วง 10.8 ± 1.5 เมกกะพาสคัล โดยชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุด คือ ชิ้นงานที่มีเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 และผงแปรงถ่านร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงดัดมีค่าเท่ากับ 12.3 เมกกะพาสคัล โดยปกติ นอกจากเส้นใยคาร์บอนจะใช้เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการนำไฟฟ้าแล้ว เส้นใยคาร์บอนยังจัดเป็นสารเสริมแรงประเภทเส้นใยที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยเส้นใยคาร์บอนเมื่อได้รับแรงจาก

ภายนอกจะสามารถกระจายแรงได้ดี ทำให้เกิดความเสถียรภายในโครงสร้าง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น [28]



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

จากรูปที่ 4.35 พบว่าชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมเส้นใยคาร์บอนเล็กน้อย ที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมเท่ากัน โดยจากรูปที่ 4.30 พบว่าชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และปริมาณผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่า B/57.5/5sec ในขณะที่ชิ้นงานที่เติมเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่า B/61.8±1.5/5sec โดยชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงสุดคือชิ้นงานที่มีเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 และผงแปรงถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดัดมีค่าเท่ากับ B/63.4/5sec

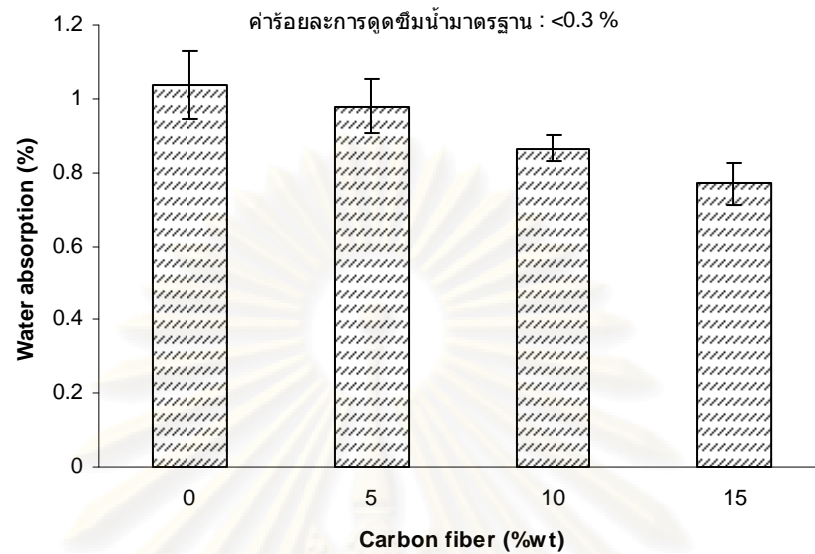


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

4.5.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำ

เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยคาร์บอนมาทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.36 พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตจะมีค่าลดลง เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนที่เติมเข้าไปจะยึดเกาะกับผนังช่องว่างที่ปรับสภาพได้ดี ทำให้ไม่มีช่องว่างที่น้ำจะแทรกซึมเข้าไปภายในชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตได้

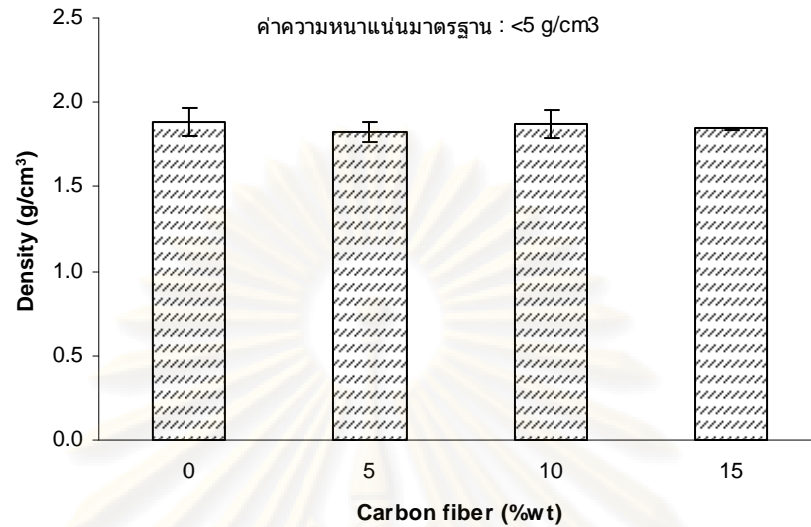
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

4.5.1.4 ความหนาแน่น

เมื่อนำชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยคาร์บอน มาทดสอบหาค่าความหนาแน่น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.37 พบว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยคาร์บอน ส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชิ้นงานคอมพอสิต ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมด้วยเส้นใยคาร์บอน (1.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เติมเส้นใยคาร์บอนจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.83 ± 0.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิง (ความหนาแน่นควรมีค่าไม่เกิน 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) [3] ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสัดส่วนของปริมาณผงแปรงถ่านที่ใช้ในชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตต่อปริมาณเส้นใยคาร์บอน พบว่าผงแปรงถ่านยังมีสัดส่วนอยู่ในปริมาณที่มาก ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ใช้ผงแปรงถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก มีค่า 1.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอนมีค่า 1.73-1.79 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งชิ้นงานส่วนใหญ่มีปริมาณผงแปรงถ่านมากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ดังนั้นแม้เส้นใยคาร์บอนจะเพิ่มปริมาณขึ้น จึงแทบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

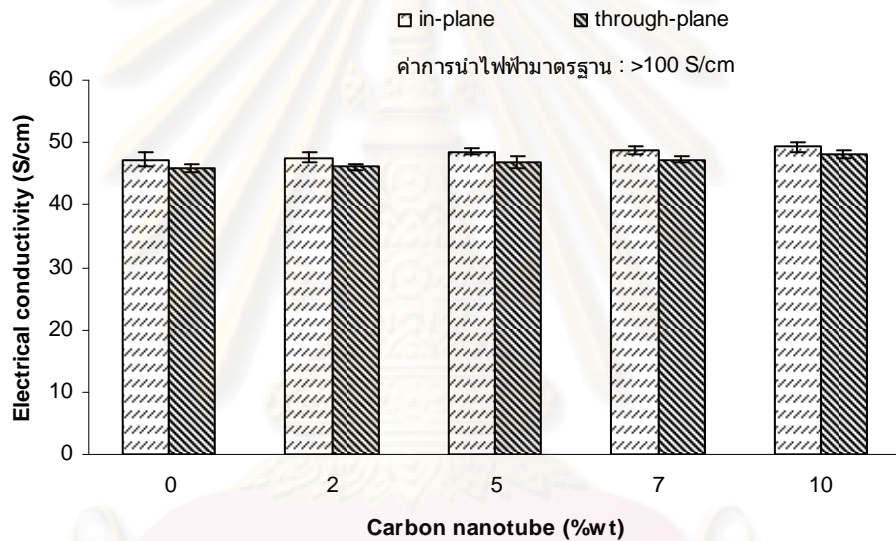
4.5.2 ท่อคาร์บอนนาโน

จากการศึกษาผลของปริมาณการเติมเส้นใยคาร์บอน พบว่า ค่าการนำไฟฟ้ายังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน จึงทำการศึกษาผลของการเติมท่อคาร์บอนนาโน ซึ่งเป็นคาร์บอนที่มีรูปทรงเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร และมีสมบัติเชิงไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยืด นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเสริมแรงอีกด้วย โดยสถานะที่เลือกมาทำการศึกษาคือ ปริมาณผงแป้งถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และปริมาณพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล

4.5.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) และในแนวทะลุผ่าน (through-plane)

ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต เมื่อศึกษาผลของท่อคาร์บอนนาโน แสดงดังรูปที่ 4.38 พบว่า เมื่อเติมท่อคาร์บอนนาโนลงในชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตซึ่งมีสัดส่วนของพอลิอะนิลีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก พอลิเอสเตอร์เรซินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

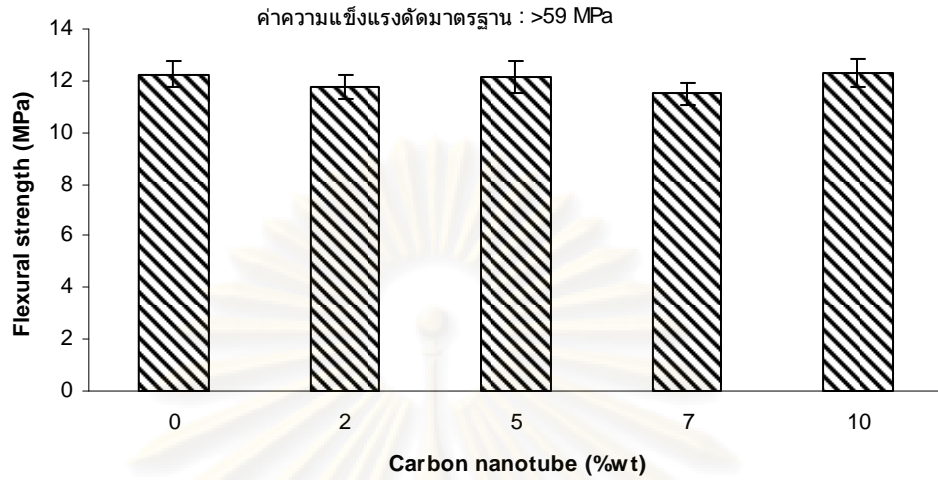
เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต เพิ่มขึ้นจากที่ไม่เติมท่อคาร์บอนนาโนเพียงเล็กน้อย โดยชิ้นงานที่ไม่มีการเติมท่อคาร์บอนนาโนมีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน 47.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนชิ้นงานที่มีการเติมท่อคาร์บอนนาโนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน 49.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนปริมาณท่อคาร์บอนนาโนต่อปริมาณผงแบเรียมที่ปรับสภาพ พบว่า ผงแบเรียมยังมีสัดส่วนอยู่ในปริมาณที่มาก ดังนั้นแม้ท่อคาร์บอนนาโนจะเพิ่มปริมาณมากขึ้น จึงแทบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและร้อยละของท่อคาร์บอนนาโนโดยน้ำหนัก เมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

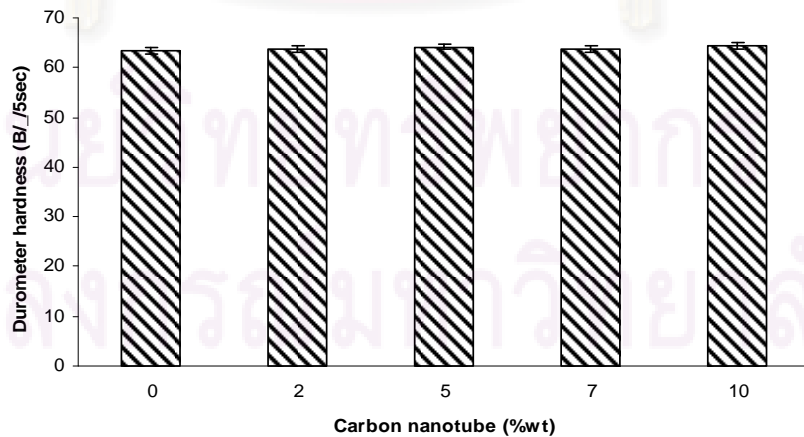
4.5.2.2 สมบัติเชิงกล

ผลการศึกษาปริมาณท่อคาร์บอนนาโนที่มีต่อค่าความแข็งแรงดัดแสดงดังรูปที่ 4.39 พบว่า เมื่อปริมาณของท่อคาร์บอนนาโนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมท่อคาร์บอนนาโน ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมท่อคาร์บอนนาโนมีค่าความแข็งแรงดัดเท่ากับ 12.3 เมกกะพาสคัล และชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมท่อคาร์บอนนาโนมีค่าความแข็งแรงดัดสูงที่สุดที่ปริมาณท่อคาร์บอนนาโนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 12.3 เมกกะพาสคัล เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงตัดและร้อยละของท่อคาร์บอนนาโนโดย
 น้ำหนักเมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

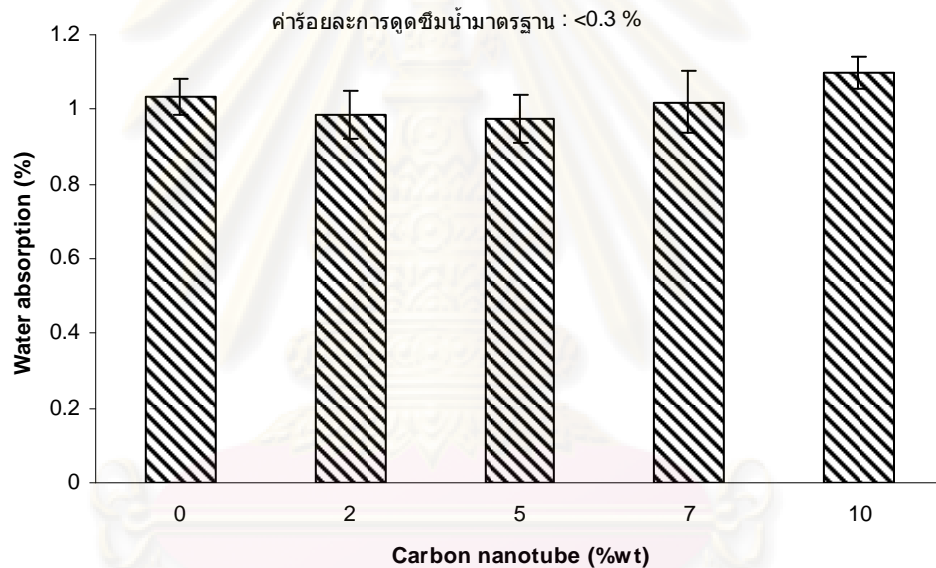
ผลการศึกษาปริมาณของท่อคาร์บอนนาโนที่มีต่อค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี แสดงดังรูปที่ 4.40 พบว่า ปริมาณท่อคาร์บอนนาโนที่เพิ่มขึ้นมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี ซึ่งงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เติมด้วยท่อคาร์บอนนาโนจะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี (B/64±0.3/5sec) ใกล้เคียงกับชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมท่อคาร์บอนนาโนเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมากที่สุด คือชิ้นงานที่มีท่อคาร์บอนนาโนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ความแข็งดูโรมิเตอร์เท่ากับ B/64.3/5sec



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของท่อคาร์บอนนาโนโดย
 น้ำหนักเมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

4.5.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำ

ผลการศึกษาปริมาณของท่อคาร์บอนนาโนที่มีต่อค่าการดูดซึมน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.41 พบว่า ชี้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เติมด้วยท่อคาร์บอนนาโนปริมาณร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยน้ำหนักจะให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยกว่าชี้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ไม่ได้เติม ซึ่งจะให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.98, 0.97 และ 1.02 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากท่อคาร์บอนนาโนซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กมากไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้น้ำไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปภายในโครงสร้างได้ ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจึงลดลง

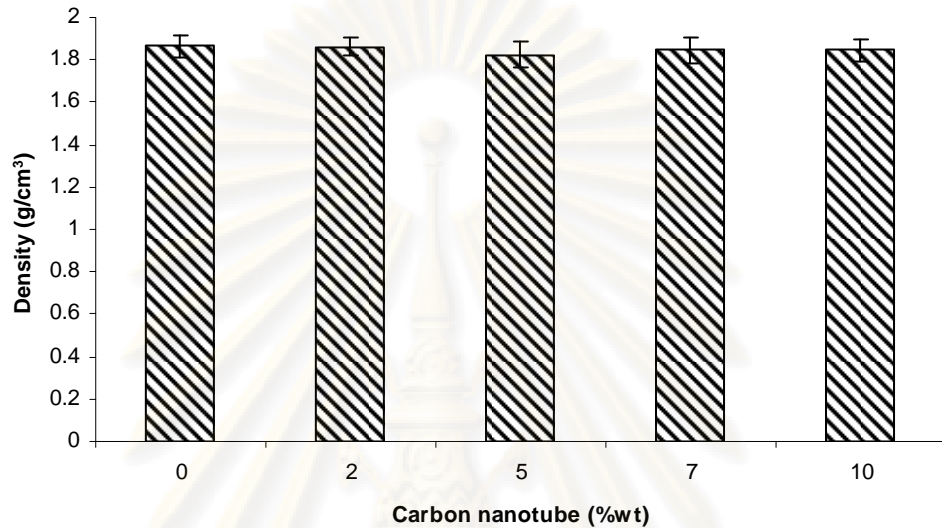


รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของท่อคาร์บอนนาโนโดยน้ำหนักเมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

4.5.2.4 ความหนาแน่น

ผลการศึกษาปริมาณของท่อคาร์บอนนาโนที่มีต่อค่าความหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 4.42 พบว่า ชี้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เติมท่อคาร์บอนนาโนจะให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.85 ± 0.015 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิง [3] โดยค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับชี้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมท่อคาร์บอนนาโน ทั้งนี้เพราะปริมาณท่อคาร์บอนนาโนที่เติมลงไปมี

ปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณผงแป้งถ่าน ดังนั้นการเติมท่อคาร์บอนนาโนลงไปในส่วนผสมจึงส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิต



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและร้อยละของท่อคาร์บอนนาโนโดยน้ำหนักเมื่อมีการเติมพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์โดยวิธีผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า ชิ้นงานที่มีการผสมผงแป้งถ่านที่ปรับสภาพลงในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และมีการเติมเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (mixed 15PANI2(t-CB)&15CF) มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด และในการขึ้นรูปสำหรับการนำไปงานในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม จะใช้แม่พิมพ์ขนาดกว้าง 11 เซนติเมตร ยาว 11 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร ซึ่งพบว่า ชิ้นงาน (mixed 15PANI2(t-CB)&15CF) ไม่สามารถขึ้นรูปสำหรับการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงได้ เนื่องจาก เมื่อขึ้นรูปให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วส่วนผสมยึดเกาะกันไม่ได้ ดังนั้นจึงศึกษาส่วนผสมอื่น โดยลดปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ เพื่อให้สัดส่วนของเรซินเพิ่มขึ้น ช่วยให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะของส่วนผสมดีขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยคาร์บอนเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักได้ พบว่า ส่วนผสมที่ดีที่สุดที่สามารถขึ้นรูปได้ คือ ชิ้นงานที่มีการผสมผงแป้งถ่านที่ปรับสภาพลงในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ที่ปริมาณพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก (7PANI) สมบัติแสดงดังตารางที่ 4.2

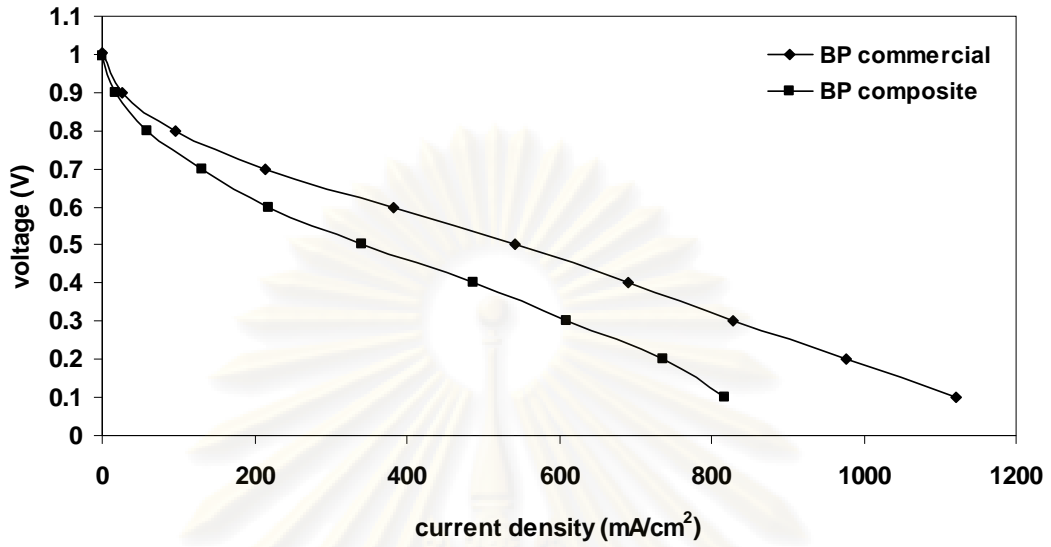
ตารางที่ 4.2 สมบัติของชิ้นงานคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมในสัดส่วนต่างๆ

สมบัติของแผ่นคาร์บอน คอมพอสิต	75%CB	75%tCB	Mixed 15%PANI2-tCB	15%CF	15%CF&10%CNT	Tested composite plate (7PANI)	Commercial plate
ค่าการนำไฟฟ้าใน แนวแกน (S/cm)	14.8	18.9	26.8	47.3	49.3	38.4	124.2
ค่าการนำไฟฟ้าในแนว ทะลุผ่าน (S/cm)	14.1	17.8	21.6	45.1	48.2	37.1	117.9
ค่าความแข็งแรงดัด (MPa)	8.3	7.9	3.8	10.9	12.3	12.8	-
ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ (B/_/5sec)	88.2	87.9	57.3	62.5	64.3	64.2	-
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	0.77	0.71	1.03	0.77	1.1	0.68	-
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.83	1.86	1.88	1.79	1.84	1.91	1.87

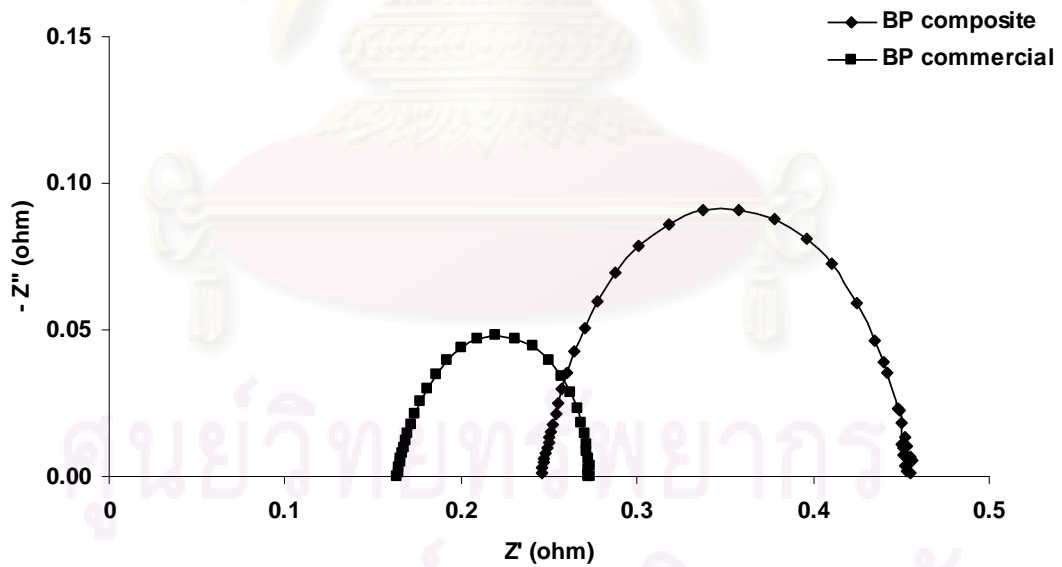
4.6 การทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้งานในเซลล์เพลิงฟิวเซลล์ จะทำการทดสอบโดยประกอบชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ใช้แผ่นคาร์บอนคอมพอสิตที่ได้จากงานวิจัย 2 แผ่น และใช้แผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ที่มีแพลทินัม 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร เตรียมโดยวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรนด้วยเทคนิคการลอก (decal transfer method) และแผ่นการแพร่ของแก๊สเป็นผ้าคาร์บอน เปรียบเทียบผลกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ โดยแสดงผลเป็นกราฟโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 4.43

จากรูปที่ 4.43 พบว่า ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัย จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (219 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ (383 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์และโมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์ 40 ปอนด์แรง-นิ้ว ทั้งนี้เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นแกรไฟต์มีค่ามากกว่า 100 ซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อพิจารณาที่ในช่วงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์และชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด เท่ากับ 1.003 และ 0.997 โวลต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาในช่วงของความต้านทานโอห์มมิก ดังแสดงในรูปที่ 4.44 พบว่า ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัยมีความต้านทานโอห์มมิก 0.246 โอห์ม และมีความสูงของเส้นกราฟมากกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ที่มีค่าความต้านทานโอห์มมิก 0.164 โอห์ม เนื่องจากประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ไม่ดีทำให้ความต้านทานโอห์มมิกของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ได้จากงานวิจัยมีค่ามาก ทำให้มีการสะสมของอิเล็กตรอนภายในเซลล์เชื้อเพลิง มีผลทำให้สมรรถนะในการทำงานของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์สูงกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย



รูปที่ 4.43 กราฟโพลาริเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์



รูปที่ 4.44 Nyquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ที่ค่าโมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์ 40 ปอนด์แรง-นิ้ว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของชนิดคาร์บอนต่อสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต พบว่า ผงคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดคือ BDH, RGN และผงแปร่งถ่านสามารถรวมตัวกับพอลิเอสเตอร์เรซินได้ในอัตราส่วนผงคาร์บอนสูงที่สุดร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก โดยผงแปร่งถ่านและ BDH ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันคือ 14.8 และ 14.4 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และมากกว่า RGN (6.8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) และเมื่อศึกษาต่อโดยนำผงแปร่งถ่านไปปรับสภาพด้วยกรด พบว่าผงแปร่งถ่านที่ปรับสภาพให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าผงแปร่งถ่านและ BDH คือ 18.9 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนสมบัติเชิงกลของแผ่นคาร์บอนคอมพอสิตยังต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานอยู่มาก ยกเว้นความหนาแน่นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

การศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีนและพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ พบว่าปริมาณพอลิอะนิลีนที่เพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าในแนวแกนและค่าการดูดซึมน้ำ แต่จะทำให้ค่าความแข็งแรงดัดลดลงอย่างมาก โดยพอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์จะให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนมากกว่าพอลิอะนิลีน

การศึกษาผลของสารเติมแต่ง ซึ่งได้แก่ เส้นใยคาร์บอน พบว่า ปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า และค่าความแข็งแรงดัดให้กับชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่มีการเติมเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จึงนำภาวะนี้มาศึกษาต่อโดยการเติมท่อคาร์บอนนาโน พบว่า การเติมท่อคาร์บอนนาโนช่วยปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลให้ดีขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับราคาที่สูงของท่อคาร์บอนนาโนจึงไม่เลือกภาวะนี้มาขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมรรถนะการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง

นอกจากนี้ จากการพิจารณาสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน พบว่า ชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะนั้น สัดส่วนที่เหมาะสมคือ ผงแปร่งถ่านที่ปรับสภาพร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักและเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก แต่ที่สภาวะนี้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดใหญ่ได้ จึงต้องเพิ่มปริมาณพอลิเอสเตอร์เรซินเพื่อให้ประสิทธิภาพการยึดเกาะเพิ่มขึ้น โดยศึกษาในอัตราส่วนพอ

ลิอะเนินนาโนไฟเบอร์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่ผสมด้วยเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าชิ้นงานที่เตรียมได้ มีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนลดลง แต่ค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น และสามารถขึ้นรูปได้แผ่นคอมพอสิตที่สมบูรณ์สามารถนำไปเจาะร่องให้เป็นช่องทางการไหลของแก๊สได้

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นคอมพอสิตในเซลล์เชื้อเพลิง โดยประกอบเข้ากับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว และหน่วยอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนที่มีแพลทินัม 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร เตรียมโดยวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรนด้วยเทคนิคการลอก พบว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัยจะให้ค่าความหนาแน่นกระแส 219 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ และให้ค่าความต้านทานโอห์มมิก 0.246 โอห์ม

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. สารช่วยยึดเกาะที่ใช้ควรมีความหนืดต่ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการรวมตัวกับสารช่วยนำไฟฟ้าประเภทคาร์บอนและสารเติมแต่ง
2. กรณีของการใช้สารช่วยยึดเกาะที่เป็นของเหลวในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องกวนผสม ควรใช้ความเร็วของใบกวนในระดับต่ำ และระยะเวลาในการกวนที่เหมาะสม เพื่อให้สารช่วยยึดเกาะและสารช่วยนำไฟฟ้าเกิดการผสมกันได้อย่างทั่วถึง
3. การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน ควรเพิ่มแรงอัดจนค่าความต่างศักย์ที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วจึงทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ได้
4. การปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน อาจทำได้โดยเลือกใช้พอลิเมอร์หรือสารที่มีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและมีโครงสร้างเป็นเส้นใยจะช่วยให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น และค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น
5. สารช่วยยึดเกาะที่ใช้ควรมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง เมื่อนำมาผสมกับผงคาร์บอนและสารช่วยนำไฟฟ้าอื่นๆ จะได้ช่วยส่งเสริมให้ได้ค่าการนำไฟฟ้าสูงตามมาตรฐาน

รายการอ้างอิง

- [1] Hoogers, G. Fuel Cell Technology Handbook. Florida :CRC Press, 2003.
- [2] Li, X. Principles of Fuel Cells. New York: Taylor&Francis, 2006.
- [3] EG&G Technical Service, Inc. Fuel Cell Handbook. 7th edition. West Virginia: U.S. Department of energy, 2002.
- [4] Metha, V. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. Journal of Power Sources 114 (2003): 32-53.
- [5] Skotheim, T., Elsenbaumer, R., and Reynolds, J. Handbook of Conducting Polymers. 2nd edition. New York: Marcel Dekker Inc., 1998.
- [6] Speegel, C. Design&Building Fuel Cells.New York: McGrawHill, 2007.
- [7] Bak, T., Nowotny, J., Rekas, M., and Sorrel, C. Photo-electrochemical hydrogen generation from water using solar energy. Materials-related aspects. Journal of Hydrogen Energy 27 (2002): 991-997.
- [8] Lister, S., and Mclean, G. PEM fuel cell electrode. Journal of Power Sources 130 (2004): 61-76.
- [9] Xianguo, L., and Imran, S. Review of bipolar plates in PEM fuel cells : flow -field designs. Journal of Hydrogen Energy 30 (2005): 359-371.
- [10] Larminie, J., and Dicks, A. Fuel Cell System Explained. Chichester: John Wiley&Sons, 2000.
- [11] IRD Fuel Cell Technology. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell [Online]. 2007. Available from: <http://www.ird.dk> [2009, August]
- [12] Meissner, R., Irgang, M., Eger, K., Weidlich, P., and Dreyer, H. US patent 5,736,076.7, 1998.
- [13] Hermann, A., Chudhuri, T., and Spagnol, P. Bipolar plate for PEM fuel cells: A review. Journal of Hydrogen Energy 30 (2005): 1297-1302.
- [14] Dhakate , S.R., Mathur , R.B., Kakati, B.K., and Dhami , T.L. Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell. Journal of Hydrogen Energy 32 (2007): 4537-4543.

- [15] HARC Center for Fuel Cells Research and Applications. Carbon filled polymer blend based bipolar plates for PEM fuel cell stack. Technology brief [Online]. 2006. Available from: <http://files.harc.edu/Projects/FuelCell/Reports/CoreTechnicalReports/BipolarPlates.pdf>. [2006,July]
- [16] Lee, S.H., Huang, C.H., and Chen, Y.P. Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel cell. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003): 688-693.
- [17] Wu, M., and Shaw, L.L. A novel concept of carbon-filled polymer blends for applications in PEM fuel cell bipolar plate. Journal of Hydrogen Energy 30 (2005): 373-380.
- [18] Pierson, H.O. Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes Properties, Process and Applications. Noyes Publications, 1993.
- [19] ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2544.
- [20] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: บริษัทบูคเน็ต, 2547.
- [21] Skotheim, T.A., and Reynolds J.R. Handbook of conducting polymers. Conjugated polymers: processing and applications. CRC Press, 3rd edition, 2007.
- [22] Aldissi, M. Inherently Conducting Polymers. Processing, Fabrication, Applications, Limitations. Noyes Data Corporation, 1989.
- [23] Stejkal, J., Sapurina, I., Proke, J., and Zemek, J. In-situ polymerized polyaniline films. Synthetic Metals 105 (1999): 195-202.
- [24] Isayev, A.I. Injection and compression molding fundamentals. Marcel Dekker, inc, 1987.
- [25] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2549.
- [26] Hui, C., Bo, L.H., Xin, L.J., Li, Y., and De, H.Y. Characteristics and preparation of polymer/graphite composite bipolar plate for PEM fuel cells. Journal of Composite Materials 43 (2009): 755-767.
- [27] Novak, I., and Krupa, I. Electro-conductive resins filled with graphite for casting applications. European Polymer Journal 40 (2004): 1417-1422.

- [28] Hwang, I.U., Yu, H.N., Kim, S.S., Lee, D.G., Suh, J.D., Lee, S.H., Ahn, B.K., Kim, S.H., Lim, T.W. Bipolar plate made of carbon fiber epoxy composite for polymer electrolyte membrane fuel cells. Journal of Power Sources 184 (2008): 90-94.
- [29] Li, D., Wang, Y., Xu, L., Lu, J., and Wu, Q. Surface modification of a natural graphite/phenol formaldehyde composite plate with expanded graphite. Journal of Power Sources 183 (2008): 571-575.
- [30] Bhlapibul, S., and Pruksathorn, K. Preparation of graphite composite bipolar plate for PEMFC. Korean J. Chem. Eng 25 (5):1226-1231.
- [31] Jia, Q.M., Li, J.B., Wang, L.F., Zhu, J.W., and Zheng, M. Electrical conductive epoxy resin composites containing polyaniline with different morphologies. Materials Science and Engineering A 448 (2007): 356-360.
- [32] Xia, L., Li, A., Wang, W., Yin, Q., Lin, H., and Zhao, Y. Effects of resin content and preparing conditions on the properties of polyphenylene sulphide resin/graphite composites for bipolar plate. Journal of Power Sources 178 (2008): 363-367.
- [33] Stejskal, J. Polyaniline. Preparation of a conducting polymer (IUPAC Technical Report). International union of pure and applied chemistry 74 (2002): 857-867.
- [34] Rahy, A., and Yang, D.J. Synthesis of highly conductive polyaniline nanofibers. Materials Letters 62 (2008): 4311-4314.
- [35] Dhakate, S.R., Sharma, R., Borah, M., Mathur, R.B., and Dhami, T.L. Expanded graphite-based electrically conductive composites as bipolar plate for PEM fuel cell. International Journal of hydrogen energys 33 (2008): 7146-7152.
- [36] พรชัย ชินสา. การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองชั้นชนิดคาร์บอนคอมพอสิตเคลือบโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [37] Pozio, A., Zaza, F., Masci, A., and Silva, R.F. Bipolar plate materials for PEMFCs : A conductivity and stability study. Journal of Power Sources 179 (2008): 631-639.

- [38] Standard Test Method for Water Absorbtion of Plastics. ASTM D570-98.
- [39] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM D790-03.
- [40] Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness. ASTM D2240-04.
- [41] ศศิธร เลิศวิริยะไพศาล. ชั้นย่อยสำหรับอิเล็กโทรดพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [42] Robberg, K. Handbook of fuel cells: Fundamentals, Technology and Applications. New York: John Wiley& Sons, 2003.
- [43] He, Y. Interfacial synthesis and characterization of polyaniline nanofibers. Materials Science and Engineering 126 (2005): 76-79.
- [44] Chen, T., Dong, C., Li, X., and Gao, J. Thermal degradation mechanism of dodecylbenzene sulfonic acid-hydrochloric acid co-doped polyaniline. Polymer Degradation and Stability 94 (2009): 1788-1794.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ก-1 สมบัติของผงคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัย

ตาราง ก1 สมบัติของผงคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของแกรไฟต์	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ผงคาร์บอนชนิด BDH	11.67±0.17	0.276
ผงคาร์บอนชนิด RGN-C	6.54±0.12	0.345
ผงแปรงถ่าน	18.64±0.13	0.728

องค์ประกอบของผงคาร์บอน	ชนิด RGN-C	ชนิดผงแปรงถ่าน
คาร์บอนคงที่ ร้อยละ	82.6	79.7
เถ้า ร้อยละ	15.1	17.8
องค์ประกอบที่ระเหยได้ ร้อยละ	2	2
ความชื้น ร้อยละ	0.3	0.5

ก-2 สมบัติของเส้นใยคาร์บอน เกรด PAN AGM 94

ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละ)	94
ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	150
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	0.99
สภาพความต้านทานตามแนวแกน (ซีเมนส์.เซนติเมตร)	1/0.0014

แหล่งข้อมูล : Asbury graphite mill, Inc. www.asbury.com

ก-3 สมบัติของท่อคาร์บอนนาโน (Multi-wall Carbon nanotubes, MWNTS)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (นาโนเมตร)	20-50
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (นาโนเมตร)	5-20
ความยาว (ไมโครเมตร)	10
ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	90
สภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเมตร)	125

แหล่งข้อมูล : ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ก-4 สมบัติของพอลิอะนิลีนโดยทั่วไป

ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	25-35
ค่าการนำไฟฟ้า (ฟิล์ม) (ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	1
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	82
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	300
ความหนาแน่น (ที่ 25 องศาเซลเซียส) (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.804

แหล่งที่มา : Sigma-Aldrich, Inc.

ก-5 สมบัติของเรซินที่ใช้ในงานวิจัย

พอลิเอสเตอร์เรซิน

ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.03
ความหนืด (เซนติพอยด์)	400-600
ความต้านแรงดึง (เมกะพาสคาล)	60
ความแข็งแรงดัด (เมกะพาสคาล)	55
ความแข็งร็อกเวล สเกลเอ็ม	95
ค่าการนำความร้อน (วัตต์/เมตร.เคลวิน)	0.5
อุณหภูมิในการเชื่อมโยง (องศาเซลเซียส)	160

แหล่งที่มา : DATA Digest Plastics Vol.1, International plastics selector, 11th ED.

San Diego, 1990

สารช่วยในการแข็งตัว (hardener)

ชื่อทางเคมี : Aliphatic polyamine

จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	>90
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.1
ความดันไอ (เมกะพาสคาล)	>0.01
การละลายน้ำ (กรัม/ลิตร)	<100
จุดที่จะเกิดประกายไฟ (องศาเซลเซียส)	>100

แหล่งที่มา : บริษัท รุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด

ตัวทำละลายเรซิน (สไตรีน)

จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	145
จุดเยือกแข็ง (องศาเซลเซียส)	-31
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.91
ความดันไอ (เมกะพาสคาล)	>0.01
การละลายน้ำ (กรัม/100 มิลลิลิตร)	<0.1%
ความหนืด (เซนติพอยด์)	0.762

แหล่งที่มา : ศูนย์ข้อมูลวัสดุอันตรายและเคมีภัณฑ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข-1 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน

ข้อมูลการทดลอง ชิ้นงานแกรไฟต์คอมพอสิตที่ใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะมีปริมาณผงแป้งถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (L) = 1 cm กระแสที่ป้อนเข้าชิ้นงาน (I) = 0.012 A

ความกว้างของชิ้นงาน = 2 cm ความหนาของชิ้นงาน = 0.3 cm

ตาราง ข1 ค่าความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารยึดเกาะ ปริมาณผงแป้งถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

ค่าความต่างศักย์ (mV) ณ ขั้วไฟฟ้า				
วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5
1.34	1.32	1.38	1.36	1.37

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต่างศักย์เฉลี่ย } (V_{\text{ave}}) &= \frac{(1.34 + 1.32 + 1.38 + 1.36 + 1.37)}{5} \\ &= 1.35 \text{ mV} = 0.00135 \text{ V} \end{aligned}$$

คำนวณค่าความต้านทานของชิ้นงานจากสมการที่ (3.1)

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$R = \frac{0.00135}{0.012}$$

$$= 0.1125 \Omega$$

คำนวณพื้นที่หน้าตัดด้านที่ถูกป้อนกระแสไฟฟ้าของชิ้นงาน (A)

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัด (A)} &= \text{ความกว้าง} \times \text{ความหนา} \\ &= 2 \times 0.3 \\ &= 0.6 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

คำนวณสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของชิ้นงานจากสมการที่ (3.2)

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (3.2)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{(0.1125 \times 0.6)}{1} \\ &= 0.0675 \text{ } \Omega \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

คำนวณค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจากสมการที่ (3.3)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{0.0675} \\ &= 14.8 \text{ S cm}^{-1} \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน

ข้อมูลการทดลอง ชิ้นงานแกรไฟต์คอมพอสิตที่ใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะมีปริมาณผงแป้งถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

$$\text{สมการหาค่าความต้านทานสัมผัส (ICR)} = \frac{R_2 - R_1}{2} \times A$$

R_1 = ค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด (Ω)

R_2 = ค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (Ω)

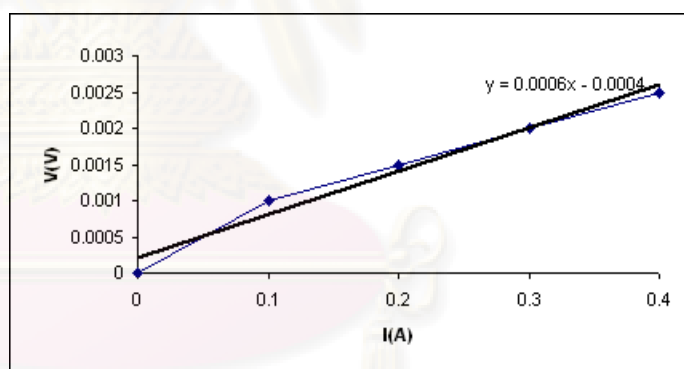
ค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือ R_1

พล็อตกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

จากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดย

สมการกฎของโอห์ม $V=IR$

I (A)	V (V)
0	0
0.1	0.001
0.2	0.0015
0.3	0.002
0.4	0.0025

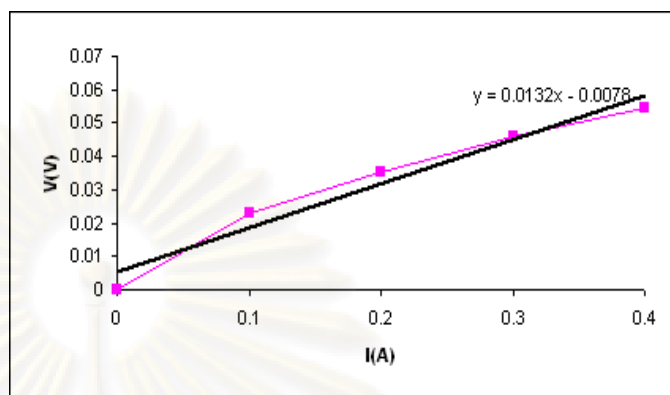


จากกราฟ ค่าความต้านทาน $R_1 = 0.0006 \Omega$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานของชิ้นงาน R_2

I (A)	V (V)
0	0
0.1	0.023
0.2	0.035
0.3	0.046
0.4	0.0543



จากกราฟ ค่าความต้านทาน $R_2 = 0.0132$

$$ICR = \frac{R_2 - R_1}{2} = \frac{0.0132 - 0.0006}{2}$$

$$= 0.0063 \Omega$$

คำนวณสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของชิ้นงานจากสมการที่ (3.2)

พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (A) = 3.38 cm^2 ความหนาของชิ้นงาน (L) = 0.3 cm

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (3.2)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\rho = \frac{(0.0063 \times 3.38)}{0.3}$$

$$= 0.07098 \Omega \text{ cm}$$

คำนวณค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจากสมการที่ (3.3)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\sigma = \frac{1}{0.07098}$$

$$= 14.088 \approx 14.1 \text{ S cm}^{-1}$$

ท-3 การคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน

ตาราง ข2 น้ำหนักแห้งและน้ำหนักเปียกของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ มีปริมาณผงแปรงถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	น้ำหนักแห้ง (Dry weight) (กรัม)	น้ำหนักเปียก (Wet weight) (กรัม)	น้ำหนักเปียก-น้ำหนักแห้ง (กรัม)
1	10.1052	10.2558	0.1506
2	10.1003	10.2459	0.1456
3	10.0834	10.2342	0.1508

คำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานจากสมการที่ (3.4)

$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำชิ้นงานที่ 1} = \frac{0.1506}{10.1052} \times 100 = 1.4903$$

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำชิ้นงานที่ 2} = \frac{0.1456}{10.1003} \times 100 = 1.4415$$

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำชิ้นงานที่ 3} = \frac{0.1508}{10.0834} \times 100 = 1.4955$$

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำชิ้นงานเฉลี่ย} = \frac{1.4903 + 1.4415 + 1.4955}{3} = 1.4758 \approx 1.476$$

ข-4 การคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

ตาราง ข3 น้ำหนักแห้งและขนาดของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นสารยึดเกาะ ปริมาณ ผงแปรงถ่านร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความกว้าง (cm)	ความยาว (cm)	ความหนา (cm)	น้ำหนักแห้ง (Dry weight) (g)
1	2.482	7.430	0.302	10.1052
2	2.480	7.400	0.299	10.1003
3	2.483	7.421	0.299	10.0834

คำนวณปริมาตรจากสูตร ปริมาตร = กว้าง x ยาว x สูง

$$\text{จะได้ ปริมาตรของชิ้นงานที่ 1} = 2.482 \times 7.430 \times 0.302 = 5.569 \text{ cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรของชิ้นงานที่ 2} = 2.480 \times 7.400 \times 0.299 = 5.487 \text{ cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรของชิ้นงานที่ 3} = 2.483 \times 7.421 \times 0.299 = 5.509 \text{ cm}^3$$

คำนวณความหนาแน่นของชิ้นงานจากสูตร ความหนาแน่น = $\frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}}$

$$\text{จะได้ ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ 1} = \frac{10.1052}{5.569} = 1.814 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ 2} = \frac{10.1003}{5.487} = 1.841 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ 3} = \frac{10.0834}{5.509} = 1.830 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงานเฉลี่ย} = \frac{1.814 + 1.841 + 1.830}{3} = 1.828 \text{ g/cm}^3$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสราณีย์ ชิมประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนศึกษานารี จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย