

ผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีน-กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกต่อสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าคาร์บอนคอม  
พอสิต



นายกิตติพงษ์ เรือนคำ

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF POLYANILINE-DODECYLBENZENESULFONIC ACID FILLER ON PROPERTIES OF  
CARBON COMPOSITE CONDUCTIVE PLATE

Mr. Kittipong Rueankham



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีน-กรดโตนีลเบนซีนซัลโฟนิคต่อสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าคาร์บอนคอมพอสิต
โดย	นายกิตติพงษ์ เรือนคำ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุลิขิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

กิตติพงษ์ เรือนคำ : ผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีน-กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคต่อสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าคาร์บอนคอมพอสิต (EFFECT OF POLYANILINE-DODECYLBENZENESULFONIC ACID FILLER ON PROPERTIES OF CARBON COMPOSITE CONDUCTIVE PLATE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เก็จฉวี พุกษาทร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, 81 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีน-กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค (DBSA-PANI) ต่อสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) ส่วนแรกศึกษาสัดส่วนของแกรไฟต์ที่เหมาะสมและภาวะในการขึ้นรูป พบว่าปริมาณแกรไฟต์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่านคือ 67 และ 27 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง 32 เมกะพาสคัล ความหนาแน่น 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.69 และความเป็นรูพรุนร้อยละ 1.37 สำหรับภาวะในการขึ้นรูป พบว่า เมื่อใช้ความดันกดอัดในช่วง 12 - 16 เมกะพาสคัล จะทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงและการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิในช่วง 100 - 190 องศาเซลเซียส คอมพอสิตจะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น และค่าการดูดซึมน้ำลดลง ส่วนเวลาในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตในช่วง 5 - 60 นาที พบว่าการใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปจะทำให้สมบัติเชิงกลและการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตดีขึ้น การศึกษาในส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของ DBSA-PANI ที่เติมลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี ที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณของ DBSA-PANI ที่เติมลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีแล้วส่งผลให้คอมพอสิตมีสมบัติที่ดีที่สุดคือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบคือ 73 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร การนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านคือ 33 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง 27 เมกะพาสคัล ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.97 ค่าความเป็นรูพรุนร้อยละ 1.8 และมีความหนาแน่น 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5771917223 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: COMPOSITE, GRAPHITE, EPOXY RESIN, POLYANILINE,  
DODECYLBENZENESULFONIC ACID, CARBON CONDUCTIVE PLATE

KITTIPONG RUEANKHAM: EFFECT OF POLYANILINE-  
DODECYLBENZENESULFONIC ACID FILLER ON PROPERTIES OF CARBON  
COMPOSITE CONDUCTIVE PLATE. ADVISOR: ASSOC. PROF. KEJVALEE  
PRUKSATHORN, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. THANAKORN  
WASANAPIARNPONG, Ph.D., 81 pp.

This research was studied the effect of polyaniline doped with dodecylbenzenesulfonic acid (DBSA-PANI) filler on properties of carbon composite plate. The first part of the research was investigated ratio of graphite and epoxy resin of composite and condition for composite molding. The result was shown that the graphite/epoxy resin composite with 85 wt.% graphite indicated the best properties. It was revealed the 67 s/cm for in-plane conductivity and 27 s/cm for through-plane conductivity, flexural strength of 32 MPa, density of 1.98 g/cm<sup>3</sup>, 0.69% of water absorption and 1.37% of porosity. For composite molding condition, the results were shown that the mechanical properties were decreased and water absorption was increased as the pressure molding increased, when the studied pressure was 12 – 16 MPa. In the opposite way, the increased temperature (100-190°C) and time molding (5-60 min), the mechanical properties of composite were increased as the water absorption was decreased. The second part of the research was studied an effect of DBSA-PANI on properties of graphite/epoxy resin composite with 85 wt.% graphite. The results were indicated that the 1 wt.% of DBSA-PANI could be increased electrical conductivity of the composite. The composite with 1 wt.% DBSA-PANI had dominated the in-plane conductivity of 73 s/cm and through-plane conductivity of 33 s/cm. The mechanical properties were not significant changed. (27 MPa of flexural strength, 0.97% water absorption, 1.8% porosity and 1.87 g/cm<sup>3</sup> of density.).

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

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

Academic Year: 2017      Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุสิทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. มะลิ ทุ่งสม และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้ทำวิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณโครงการ “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต” จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และให้กำลังใจทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงแกว.....	6
2.1.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแกวแบบระนาบสองขั้ว (Planar-bipolar stack fuel cell) ....	6
2.1.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแกวแบบทิวบูลาร์เซลล์ (Tubular cell stack fuel cell).....	7
2.1.3 สมดุลโรงงาน.....	8
2.1.4 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง.....	8
2.1.5 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	11
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane (PEM) fuel cell).....	12

2.3	แผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	16
2.4	แกรไฟต์ .....	17
2.5	เรซินอีพ็อกซี .....	21
2.6	พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	23
2.7	กระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมเซตเรซิน .....	25
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย .....	28
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	28
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.3.1	การศึกษาคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี).....	29
3.3.1.1	การเตรียมคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี).....	29
3.3.1.2	การศึกษาปริมาณแกรไฟต์ที่เหมาะสมในคาร์บอนคอมพอสิต .....	29
3.3.1.3	การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคาร์บอนคอมพอสิต .....	31
3.3.2	การศึกษาผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีนที่เจือด้วยกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค (DBSA-PANI) ต่อสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต .....	31
3.3.2.1	การเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ DBSA-PANI.....	32
3.3.2.2	การเตรียมสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (DBSA-PANI/ แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) ...	33
3.3.3	การทดสอบสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต.....	34
3.3.3.1	การวัดค่าการนำไฟฟ้า .....	34
3.3.3.2	การศึกษาสมบัติเชิงกล .....	36
3.3.3.3	การทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	36
3.3.3.4	การทดสอบความเป็นรูพรุน.....	36



3.3.3.4 การวัดความหนาแน่น.....	37
3.3.3.5 ศึกษาสัณฐานวิทยา .....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	38
4.1 สมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี).....	38
4.1.1 ผลของปริมาณอัตราส่วนแกรไฟต์ในคอมพอสิตและรูปแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปคอมพอสิต.....	38
4.1.1.1 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่าน .....	38
4.1.1.2 สมบัติเชิงกล.....	42
4.1.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำ.....	43
4.1.1.4 ค่าความเป็นรูพรุน.....	44
4.1.1.5 ความหนาแน่น .....	45
4.1.2 ภาวะในการอัดขึ้นรูป.....	46
4.1.2.1 ความดันในการอัดขึ้นรูป .....	47
4.1.2.2 อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป.....	49
4.1.2.3 เวลาในการอัดขึ้นรูป.....	52
4.1.2.4 ความหนาแน่น .....	53
4.2 ศึกษาผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโตนิกเบนซีนซัลโฟนิกที่มีต่อสมบัติของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิต .....	56
4.2.1 พอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโตนิกเบนซีนซัลโฟนิก (DBSA-PANI).....	56
4.2.2 สมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (DBSA-PANI/ แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี).....	57
4.2.2.1 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่าน .....	58
4.2.2.2 สมบัติเชิงกล.....	60
4.2.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความเป็นรูพรุน.....	61
4.2.2.4 ความหนาแน่น .....	62

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	64
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	65
รายการอ้างอิง .....	66
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลสมบัติสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	70
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์และการคำนวณค่าการนำไฟฟ้า .....	72
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์และการคำนวณค่าความทนต่อแรงตัดโค้ง .....	76
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์และการคำนวณค่าการดูดซึมน้ำ .....	78
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์และการคำนวณค่าความเป็นรูพรุน.....	79
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์และการคำนวณค่าความหนาแน่น.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เป้าหมายสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้น .....	16
ตารางที่ 2.2 สมบัติของทางกายภาพของแกรไฟต์ .....	18
ตารางที่ 2.3 สมบัติของทางความร้อนของแกรไฟต์ .....	18
ตารางที่ 2.4 ความทนต่อสารเคมีของแกรไฟต์ .....	19
ตารางที่ 2.5 การใช้เรซินอีพ็อกซีในงานต่างๆ .....	21
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนแกรไฟต์และเรซินอีพ็อกซีในคอมพอสิต.....	30
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนแกรไฟต์และเรซินอีพ็อกซีในคอมพอสิต.....	31
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนแกรไฟต์ เรซินอีพ็อกซีและ DBSA-PANI ในคอมพอสิต.....	33
ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของคอมพอสิตที่มีขึ้นรูปด้วยภาวะในการทดลองที่แตกต่างกัน.....	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน .....	2
รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน .....	2
รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังการไหลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในเซลล์เชื้อเพลิง .....	6
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแฉกแบบระนาบสองขั้ว .....	7
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบสแตกแบบทิวบูลาร์เซลล์ .....	7
รูปที่ 2.4 วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิง .....	8
รูปที่ 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในโครงการ Apollo .....	9
รูปที่ 2.6 Green Car รถยนต์คันแรกที่ขับเคลื่อนโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบชนิดเยื่อแลกเปลี่ยน โปรตอน .....	10
รูปที่ 2.7 หุ่นของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิง .....	10
รูปที่ 2.8 สิทธิบัตรเซลล์เชื้อเพลิงที่เผยแพร่ต่อสาธารณะต่อปี .....	11
รูปที่ 2.9 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง .....	12
รูปที่ 2.10 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM .....	13
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง PEM .....	14
รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ .....	17
รูปที่ 2.13 โครงสร้าง band ของสารกึ่งตัวนำ .....	19
รูปที่ 2.14 การสังเคราะห์ prepolymer ของ epoxy resin .....	22
รูปที่ 2.15 กระบวนการเชื่อมขวางของเรซินอีพ็อกซี .....	22
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของพอลิเมอร์ conjugate แบบต่างชนิดกัน .....	23
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของพอลิอะนิลีน .....	24

รูปที่ 2.18 การเจือด้วยกรดในพอลิอะนิลีน emeraldine base .....	24
รูปที่ 2.19 ภาพของเครื่อง compression molding .....	25
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์ทั้งสองแบบ (ก) แม่พิมพ์แบบแผ่น (ข) แม่พิมพ์แบบลูกเต๋า.....	30
รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนของสารผสมในระหว่างการสังเคราะห์ DBSA-PANI .....	32
รูปที่ 3.3 four-point probe ของบริษัท JANDEL รุ่น RM3-AR.....	34
รูปที่ 3.4 แผนผังอุปกรณ์ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน.....	35
รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางตำแหน่งของชิ้นงานขณะทดสอบ 3 points blending .....	36
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบการชั่งน้ำหนักทั้งสองแบบ .....	37
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	39
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	40
รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิต .....	41
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิตโดยมีแกรไฟต์อยู่ที่ ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก (ก) ใช้แม่พิมพ์แบบลูกเต๋าในการขึ้นรูป (ข) ใช้แม่พิมพ์แบบแผ่นในการขึ้นรูป (วงกลมชี้ให้เห็นถึงรูพรุนในคอมพอสิต).....	42
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	43
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตโดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที....	44
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นรูพรุนและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตโดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที .....	45

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตโดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที .....	46
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที .....	47
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	48
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ/ความเป็นรูพรุนความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที .....	49
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 15 นาที.....	49
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 15 นาที .....	50
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิตโดยมีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ (a) 130 องศาเซลเซียส (b) 100 องศาเซลเซียส .....	51
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ/ความเป็นรูพรุนและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 15 นาที.....	51
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส .....	52

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.....	53
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ/ความเป็นรูพรุนและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส .....	53
รูปที่ 4.19 แสดงการสังเคราะห์ DBSA-PANI .....	56
รูปที่ 4.20 FTIR spectra ของผง DBSA-PANI ที่สังเคราะห์ได้.....	57
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที .....	58
รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของ DBSA-PAN/แกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิต (ก) Gr/E (85/15) (ข) DBSA-PANI 0.5 wt.% (ค) DBSA-PANI 1 wt.% (ง) DBSA-PANI 2 wt.%.....	59
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที .....	60
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	61
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	62
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นรูพรุนและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที.....	62

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอลิเมอร์ โดยคอมพอลิเมอร์อัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที..... 63





## บทที่ 1

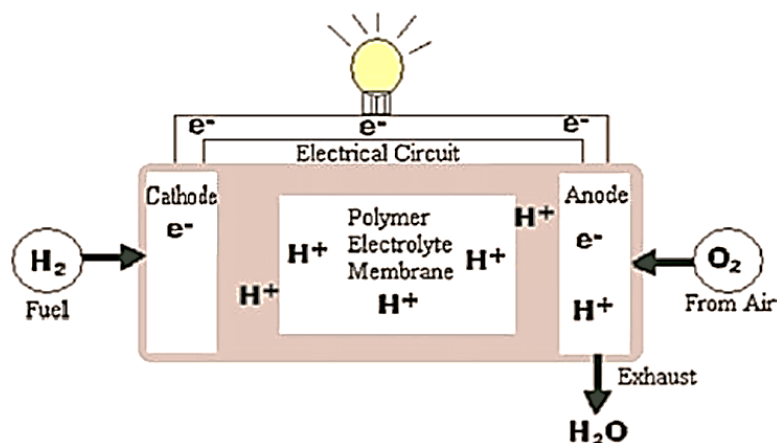
### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

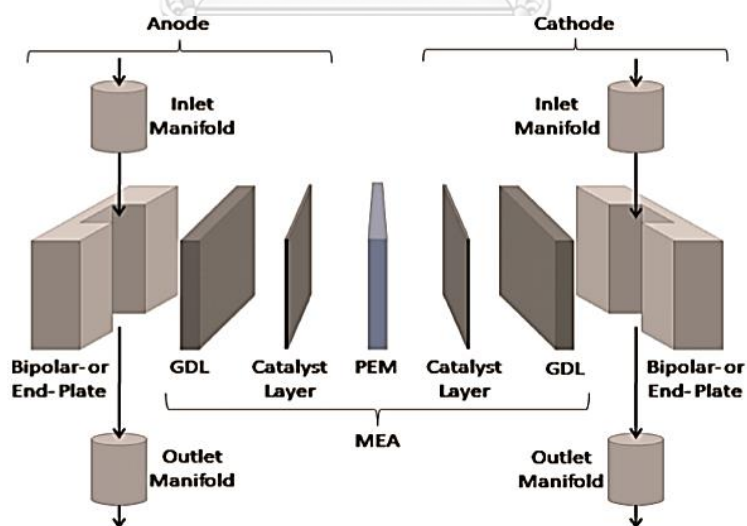
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงซึ่งสามารถนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นแหล่งกระแสไฟฟ้าในการขนส่ง ภายในอาคาร และ อุปกรณ์เสริมในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานผลิตไฟฟ้า [1] โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ โดยทั่วไป คือ แก๊สไฮโดรเจน เอทานอล และเมทานอล เป็นต้น ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ากับออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นกระแสไฟฟ้า ความร้อน น้ำ และ สารที่เกิดจากปฏิกิริยาในเชื้อเพลิง ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในกรณีที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง และให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน เซลล์เชื้อเพลิงแบ่งออกเป็นหลายชนิด ชนิดที่น่าสนใจคือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)) เนื่องจากมีประสิทธิภาพและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง อุณหภูมิในการใช้งานต่ำ และเริ่มต้นทำงานได้เร็ว [2] เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode) แอโนด (Anode) และแผ่นเมมเบรน (Membrane) มีหลักการทำงานดังนี้ ไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์ที่ขั้วแอโนดและออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ที่ขั้วแคโทด ในส่วนของโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าข้างนอก ที่ขั้วแคโทดออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับโปรตอนและอิเล็กตรอนได้ผลิตภัณฑ์เป็นความร้อนและน้ำ [3] ดังรูปที่ 1.1 และส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนจะแสดงในรูปที่ 1.2

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนสามารถนำมาใช้ในงานตั้งแต่ระดับพลังงานไม่กี่วัตต์จนถึงระดับเมกะวัตต์ เพื่อเป็นแหล่งพลังงานของโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์พกพา ยานพาหนะและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า [3] แต่โดยส่วนมากแล้วนิยมประยุกต์ใช้ในด้านยานพาหนะเนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสม แต่การนำมาใช้งานจริงนั้นยังต้องมีการปรับปรุงทั้งในด้านความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) ต้นทุนการผลิต และความทนทาน ซึ่งจะเห็นว่าการปรับปรุงจะต้องไม่ปรับปรุงในส่วนของเมมเบรนเท่านั้นแต่จะต้องปรับปรุงในส่วนของขั้วหรือแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ด้วยเช่นกัน ซึ่งแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้วถือได้ว่าเป็นโครงสร้างหลักของเซลล์เชื้อเพลิง หนึ่งปัญหาความสำคัญของแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้วคือ มีน้ำหนักประมาณร้อยละ 80 ของ

น้ำหนักทั้งหมดและมีต้นทุนการผลิตประมาณร้อยละ 30 ถึง 40 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิง [4] ซึ่งถ้าสามารถพัฒนาให้มีน้ำหนักเบาและราคาถูกลงได้ จะช่วยทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีน้ำหนักของลดลงและราคาถูกลง



รูปที่ 1.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [4]



รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [4]

สมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นประกอบด้วย ช่องทางเดินของแก๊สช่วยให้แก๊สกระจายตัวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอในพื้นที่เซลล์ แยกเชื้อเพลิงแก๊สและสารออกซิไดซ์ได้ดี สามารถที่นำอิเล็กตรอนได้ดี ไม่ดูดซึมน้ำ และต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดี ดังนั้นแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นจะต้องมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่มีความสมดุลกัน ซึ่งมาตรฐานที่กำหนดโดยกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา (US Department of Energy) คือแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นจะต้องมีค่าการนำกระแสไฟฟ้าในแนวระนาบ (In-plane electrical conductivity) มากกว่า 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural strength) มากกว่า 25 MPa [5]

วัสดุที่ใช้ทำแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นมีหลายชนิดเช่น สแตนเลส อะลูมิเนียม และไทเทเนียม แต่แกรไฟต์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยม เพราะมีความโดดเด่นในเรื่องการนำกระแสไฟฟ้าที่ดีและทนต่อการกัดกร่อน แต่มีข้อด้อยคือมีสมบัติที่เปราะจึงแตกหักง่ายเมื่อขึ้นรูปและเซาะช่องทางเดินแก๊ส หรือเวลาถอดเพื่อประกอบเซลล์ โดยวิธีการแก้ไขข้อด้อยดังกล่าวทั่วไปนิยมใช้พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ทั้งเทอร์โมเซตเรซิน (Thermoset resins) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ผสมกับแกรไฟต์ในรูปแบบของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite) [6] หนึ่งในพอลิเมอร์คอมโพสิตดังกล่าวคือ แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี (Graphite/Epoxy resin) จากงานวิจัยของ Lee และคณะ [7] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเรซินอีพ็อกซีในคอมโพสิตส่งผลให้คอมโพสิตมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของค่าการนำกระแสไฟฟ้าจะลดลง เนื่องจากเรซินอีพ็อกซีไม่มีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้างั้นจึงขัดขวางการนำกระแสไฟฟ้าระหว่างอนุภาคแกรไฟต์ มีการศึกษาการเพิ่มสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าให้เรซินอีพ็อกซีโดย Jia และคณะ [8] พบว่าการใช้พอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโตนิกเบนซีนซัลโฟนิกเติมลงไปนเรซินอีพ็อกซีจะทำให้เรซินอีพ็อกซีมีสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการใช้เรซินอีพ็อกซีที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าดังกล่าวมาใช้เป็นสารยึดเกาะแกรไฟต์แทนการใช้เรซินอีพ็อกซีปกติ

งานวิจัยนี้สนใจในการพัฒนาแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นที่ทำจากคาร์บอนคอมโพสิตให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลที่ดี โดยนำพอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโตนิกเบนซีนซัลโฟนิกซึ่งมีสมบัติการนำไฟฟ้ามาผสมลงในคาร์บอนคอมโพสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) เพื่อใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยมีสมมติฐานว่าพอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโตนิกเบนซีนซัลโฟนิกจะช่วยเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าและความต้านทานการหักงอของคาร์บอนคอมโพสิตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคต่อสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมแผ่นนำไฟฟ้าคาร์บอนคอมพอสิตโดยใช้แกรไฟต์และสารตัวเติมได้แก่ เรซินอีพ็อกซีและพอลิอะนิลีนโดปด้วยกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค
2. ขึ้นรูปคาร์บอนคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding)
3. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และโครงสร้างสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนดังนี้

1. ศึกษาและเตรียมคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) ตัวแปรต้นที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณแกรไฟต์ ชนิดแม่พิมพ์และภาวะในการอัดขึ้นรูป ตัวแปรตามคือสมบัติของคอมพอสิตได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และโครงสร้างสัณฐานวิทยา
2. ศึกษาและเตรียมคาร์บอนคอมพอสิต (DBSA-PANI/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) ตัวแปรต้นที่ศึกษาคือปริมาณ DBSA-PANI และตัวแปรตามคือสมบัติของคอมพอสิตได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และโครงสร้างสัณฐานวิทยา

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุคาร์บอนคอมพอสิตที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าแบบของขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนตามสมบัติขั้นพื้นฐาน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เซลล์เชื้อเพลิง [9]

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง มีศักยภาพสูงในการผลิตไฟฟ้าและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำเนื่องจากหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ใช้หลักการผลิตความร้อนและงานเชิงกลเหมือนเครื่องจักรกลสันดาปภายในซึ่งมีข้อจำกัดทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ถูกจำกัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานโดยประสิทธิภาพ Carnot (Carnot efficiency) ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่มีแก๊สของเสียหลังกระบวนการสันดาปภายในที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงแตกต่างกับแบตเตอรี่คือต้องมีการป้อนสารสำหรับทำปฏิกิริยาเพื่อให้สามารถใช้งานอย่างต่อเนื่อง เซลล์เชื้อเพลิงทำงานผันกลับกับอิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) จึงสามารถใช้เป็นแหล่งเก็บพลังงานได้

เชื้อเพลิงและออกซิแดนท์ที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดแต่ในปัจจุบันเชื้อเพลิงที่นิยมใช้คือ ไฮโดรเจนและออกซิแดนท์คือ ออกซิเจนในอากาศ

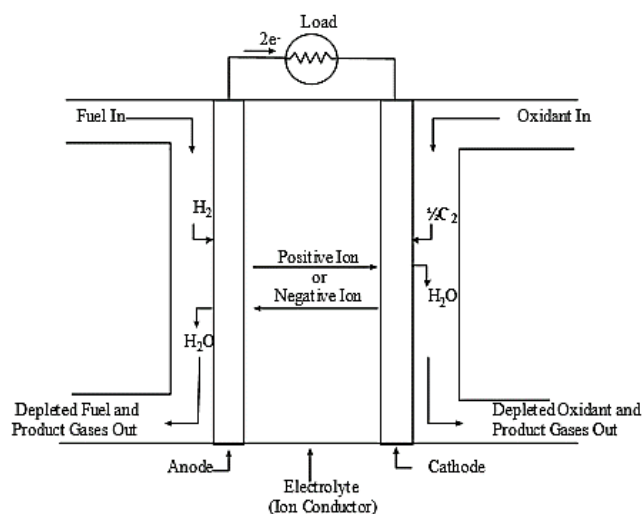
ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยองค์ประกอบดังนี้

- หน่วยเซลล์เชื้อเพลิง (Unit Fuel Cell) เป็นแหล่งเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- เซลล์เชื้อเพลิงแถว (Stack Fuel Cell) เกิดจากการนำหน่วยเซลล์เชื้อเพลิง หลากหลายหน่วยมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ
- สมดุลของโรงงาน (Balance of Plant) ประกอบด้วยหน่วยต่างๆ เช่น ระบบควบคุมสารเข้า ระบบจัดการความร้อน ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้า และอื่นๆ

##### 2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้า โครงสร้างของหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะเป็นบล็อก ประกอบไปด้วยชั้นของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte layer) ที่ประกอบด้วยขั้วแอโนดและแคโทดในแต่ละด้าน

รูปที่ 2.1 แสดงการไหลของเชื้อเพลิงและสารผลิตภัณฑ์รวมถึงแสดงการเคลื่อนที่ของไอออนในหน่วยเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังการไหลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในเซลล์เชื้อเพลิง [9]

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงในรูปที่ 2.1 ป้อนเชื้อเพลิงเข้าทางแอโนด (ซ้าย) และสารออกซิแดนท์หรือออกซิเจนป้อนเข้าทางแคโทด (ขวา) ซึ่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะเกิดตรงขั้วไฟฟ้าทั้งสองและผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรไลต์ ในขณะที่เดียวกันก็จะขับเคลื่อนกระแสไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ผ่านโหลดวงจรกระแสไฟฟ้าภายนอก

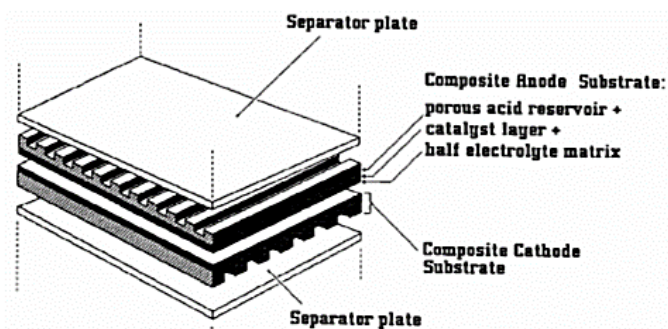
### 2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงแถว

การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงส่วนมากจะนำเอาหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าในระดับที่ต้องการสำหรับนำไปใช้งาน โดยทั่วไปแล้วเซลล์เชื้อเพลิงแถวประกอบไปด้วยหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันเป็นอนุกรมกัน ซึ่งรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงแถวที่มีการพัฒนาในปัจจุบันมีดังนี้

#### 2.1.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแถวแบบระนาบสองขั้ว (Planar-bipolar stack fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงแถวแบบระนาบสองขั้วประกอบไปด้วยหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงที่เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าโดยมีแผ่นที่ใช้ในการเชื่อมต่อเรียกว่าแผ่นกั้น (separator plate) แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแผ่นกั้นดังกล่าวจะมีหน้าที่ดังนี้

- เพื่อเชื่อมต่อหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอนุกรมทางไฟฟ้า
- เพื่อแยกเชื้อเพลิงและออกซิแดนท์ออกจากกันของหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงที่อยู่ติดกัน

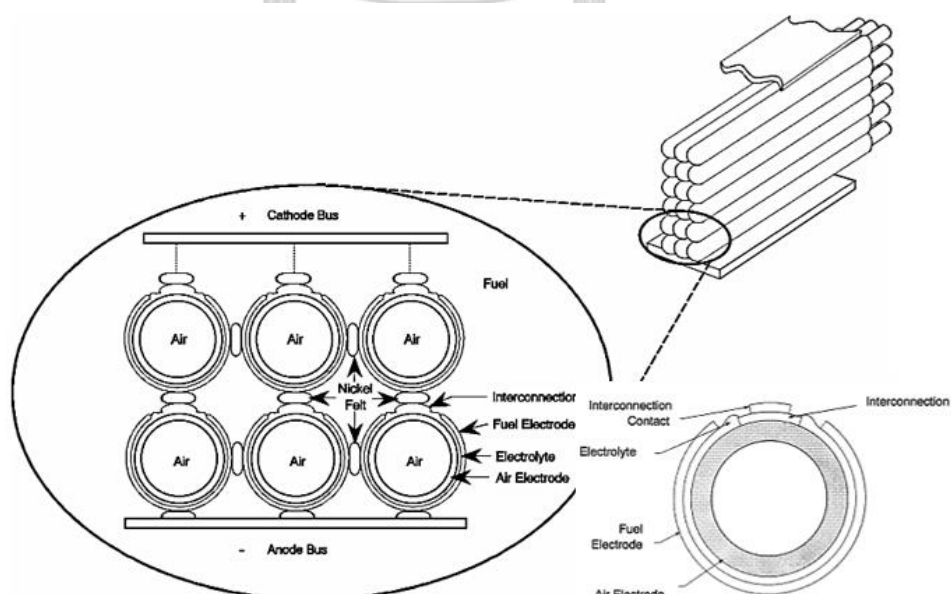


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแฉกแบบระนาบสองขั้ว [9]

ซึ่งในการออกแบบแผ่นกัน อาจจะมีการเพิ่มช่องในการไหลของแก๊สเพื่อให้แก๊สสามารถไหลได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอภายในเซลล์

### 2.1.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแฉกแบบทิวบูลาร์เซลล์ (Tubular cell stack fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงแฉกชนิดนี้นิยมใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอุณหภูมิสูง ซึ่งทิวบูลาร์เซลล์มีประโยชน์อย่างยิ่งในการป้องกันการรั่วซึมและเป็นโครงสร้างของเซลล์ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงแฉกรูปแบบนี้ ออกแบบค่อนข้างยากเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่สูง เซลล์เชื้อเพลิงแฉกแบบทิวบูลาร์เซลล์แสดงดังรูปที่ 2.3 กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นรอบๆ ท่อ ดังนั้นการต่อเซลล์เข้าด้วยกันจะเป็นลักษณะตั้งฉากกันหรืออาจต่อกันจากด้านปลายท่อ ซึ่งการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแฉกคือการทำให้ความยาวของวงจรรนำกระแสไฟฟ้าสั้นที่สุด



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบสแตกแบบทิวบูลาร์เซลล์ [9]

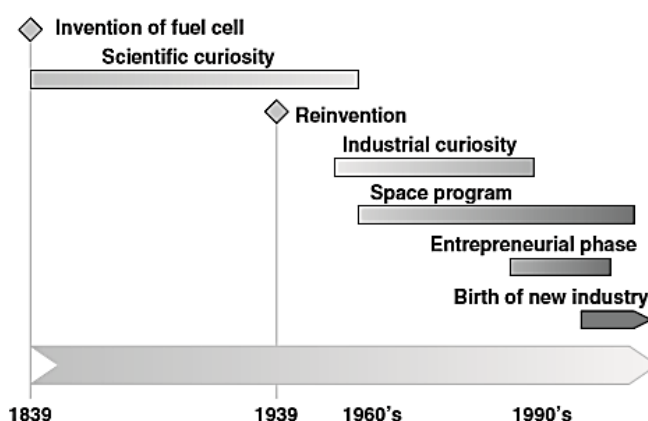
### 2.1.3 สมดุลโรงงาน

นอกจากเซลล์เชื้อเพลิงแก๊วแล้วระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องประกอบไปด้วยหลายๆ ระบบ โดยปกติประกอบไปด้วยระบบดังต่อไปนี้

- ระบบเตรียมเชื้อเพลิง เพื่อให้เชื้อเพลิงบริสุทธิ์มากขึ้นในกรณีที่ไม่ได้ใช้แก๊สไฮโดรเจน บริสุทธิ์สูงรวมถึงการปรับอุณหภูมิของเชื้อเพลิงก่อนป้อนเข้าในเซลล์เชื้อเพลิงแก๊ว
- ระบบอากาศ ประกอบไปด้วยระบบอัดอากาศหรือพัดลมสำหรับควบคุมการไหลของอากาศ
- ระบบจัดการความร้อน เป็นระบบที่สำคัญในเซลล์เชื้อเพลิงในด้านป้องกันความร้อนสูงเกินไปในเซลล์เชื้อเพลิง
- ระบบจัดการน้ำ
- เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงจะให้แรงดันไฟฟ้าที่ไม่คงที่จึงไม่สามารถ นำมาต่อกับอุปกรณ์ใช้งานได้โดยตรงจึงต้องมีอุปกรณ์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าให้คงที่

### 2.1.4 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง [10]

วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงในรูปที่ 2.4 ปรัชญาการค้นพบเซลล์เชื้อเพลิงถูกค้นพบครั้งแรกโดย Christain F. Shoenbein นักวิทยาศาสตร์ชาวสวิสเยอรมันในปี ค.ศ. 1938 จากพื้นฐานความรู้เดิมที่ได้มีการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นครั้งแรกโดย Welsh นักวิทยาศาสตร์และ Sir William Grove ทนายความ ในปี ค.ศ. 1839 ต่อมาในปีค.ศ. 1842 Grove ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นครั้งแรก ซึ่งถูกเรียกว่า “แบตเตอรี่แบบแก๊ส” (Gaseous voltaic battery) ให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าโดยการใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจน



รูปที่ 2.4 วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิง [10]

อย่างไรก็ตาม มีความพยายามที่จะสร้างเซลล์เชื้อเพลิงเป็นระยะๆ แต่ก็ยังไม่มีอะไรเกิดขึ้น นอกจากความอยากรู้ทางวิทยาศาสตร์เป็นเวลาเกือบทศวรรษ ในช่วงเวลาดังกล่าว Ostwald ซึ่งได้รับ



รางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 1909 และเป็นบิดาแห่งเคมีฟิสิกส์ ได้สร้างทฤษฎีเพื่อความเข้าใจในการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมาก เขาเชื่อว่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในถูกจำกัดโดยประสิทธิภาพ Carnot และผลของระดับมลภาวะในอากาศที่มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยตรงอย่างมีประสิทธิภาพสูง เงียบ และไม่ปล่อยมลภาวะทางอากาศ เขาได้คาดการณ์เอาไว้ว่าจะต้องมีการปฏิวัติด้านพลังงานขึ้นถึงแม้จะใช้เวลายาวนาน

เป็นระยะเวลามากกว่า 100 ปี หลังจาก Grove ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นครั้งแรก ได้มีวิศวกรชาวอังกฤษชื่อว่า Bacon เริ่มศึกษาและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงในปี ค.ศ. 1932 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1952 ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 5 กิโลวัตต์ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงครั้งแรกเกิดขึ้นโดยโครงการด้านอวกาศของสหรัฐอเมริกา เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งสร้างและพัฒนาโดย Grubb และ Niedrach ในปี ค.ศ. 1960 นำมาใช้ในโครงการ Gemini และต่อมาใช้ในโครงการ Apollo เซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถผลิตพลังงานสำหรับใช้ในการอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตและการสื่อสาร เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ใน Apollo มีชื่อว่า Bacon ถูกสร้างโดย Pratt และ Whitney ในรูปที่ 2.5 ต่อมาในปี ค.ศ. 1965 General Motors เริ่มทำการทดลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงในรถแวน แม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ในโครงการในอวกาศจนถึงทุกวันนี้ แต่ดูเหมือนว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกล้มเลิกในการประยุกต์ใช้งานในภาคพื้นดินจนกระทั่งในช่วงต้นของปี ค.ศ. 1990 ซึ่งในปี ค.ศ. 1989 บริษัท Perry Energy System และ Ballard ประสบความสำเร็จในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงในเรือดำน้ำ ต่อมาในปี ค.ศ. 1993 บริษัท Ballard ได้จัดแสดงรถบัสโดยสารที่ขับเคลื่อนโดยเซลล์เชื้อเพลิงและในปีเดียวกัน

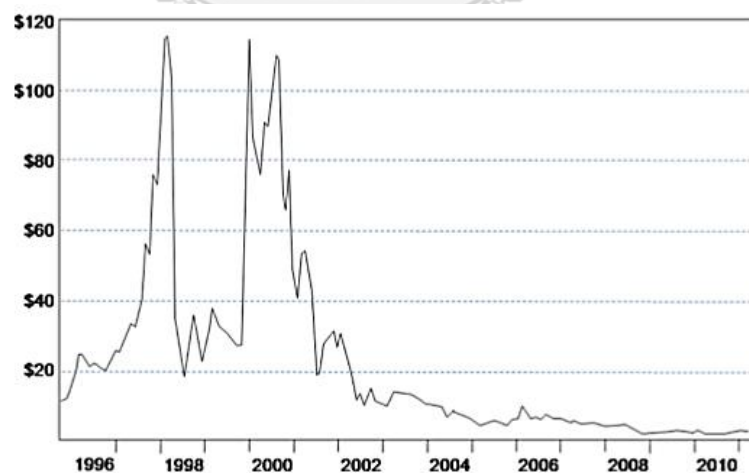


รูปที่ 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในโครงการ Apollo [10]

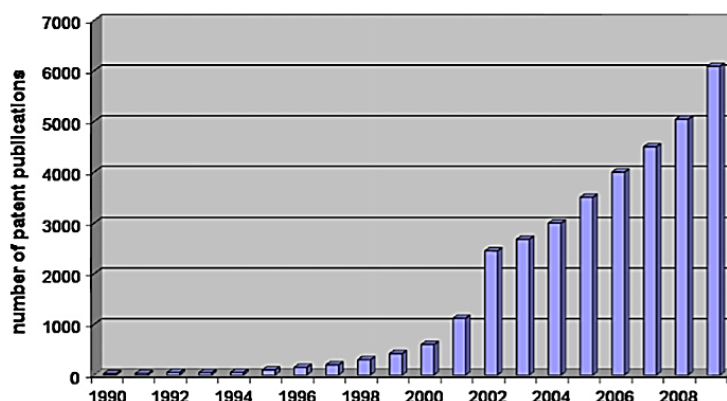
บริษัท Energy Partners ได้สร้างรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนสำเร็จเป็นครั้งแรกซึ่งรูปรถดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.6 และในช่วงปลายทศวรรษที่ 90 บริษัทผลิตรถยนต์ต่างๆได้พัฒนาและสาธิตรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน อุตสาหกรรมใหม่ได้เกิดขึ้น ในช่วงต้นปี ค.ศ. 2000 หุ้นของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิงทะยานเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากสัญญาของการปฏิวัติพลังงานใหม่แต่ก็ลดลงในปลายปี ค.ศ. 2001 (รูปที่ 2.7) ในส่วนของสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงทั่วโลกได้มีการเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.8) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสนใจในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงของวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์



รูปที่ 2.6 Green Car รถยนต์คันแรกที่ขับเคลื่อนโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน [10]



รูปที่ 2.7 หุ้นของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิง [10]



รูปที่ 2.8 สิทธิบัตรเซลล์เชื้อเพลิงที่เผยแพร่ต่อสาธารณะต่อปี [10]

### 2.1.5 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงแบ่งตามอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ดังนี้ (รูปที่ 2.9)

1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cell)

ใช้สารละลาย KOH ความเข้มข้นร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับทำงานที่อุณหภูมิสูง 250 องศาเซลเซียส ถ้าต้องการใช้อุณหภูมิต่ำลงน้อยกว่า 120 องศาเซลเซียส จะต้องใช้สารละลาย KOH ความเข้มข้นร้อยละ 35-50 โดยน้ำหนัก สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้หลากหลาย และในเชื้อเพลิงและออกซิเจนจะต้องไม่มี  $\text{CO}_2$

2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell)

ใช้เยื่อแผ่นพอลิเมอร์ลักษณะบาง ความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เป็นอิเล็กโทรไลต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลตินัมที่อยู่บนผิวคาร์บอน อุณหภูมิในการเดินเครื่องที่ 60–80 องศาเซลเซียส

3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell)

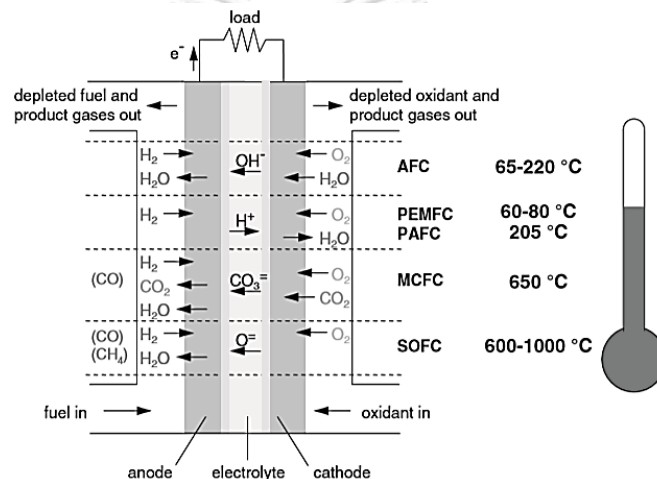
ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์โดยภาชนะที่บรรจุกรดฟอสฟอริกโดยปกติจะทำจาก SiC ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วทั้งสองคือแพลตินัม ทำงานที่อุณหภูมิ 150 – 220 องศาเซลเซียส

#### 4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten carbonate fuel cell)

อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยแอลคไลน์คาร์บอเนตหลายชนิดรวมกันอยู่ในสถานะ  $\text{LiAlO}_2$  ใช้อุณหภูมิที่ 600 – 700 องศาเซลเซียส ในการเดินเครื่อง เนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิตั้งนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell)

อิเล็กโทรไลต์จะใช้โลหะออกไซด์ที่ไม่มีรูพรุน โดยปกติจะใช้  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilized  $\text{ZrO}_2$  โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียส และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

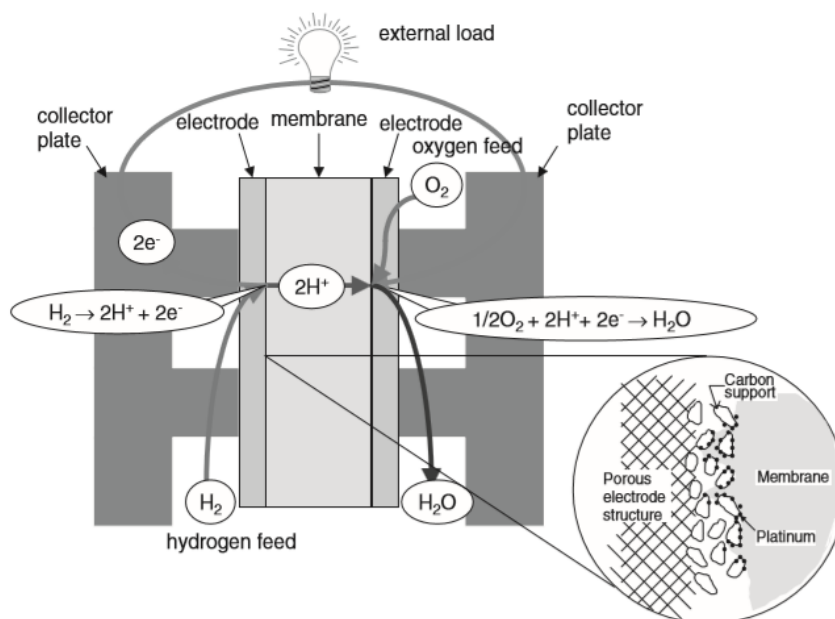


รูปที่ 2.9 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง [10]

### 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane (PEM) fuel cell) [11]

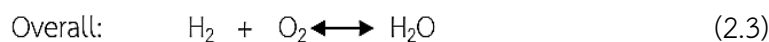
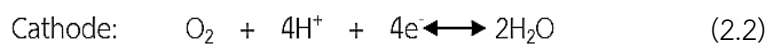
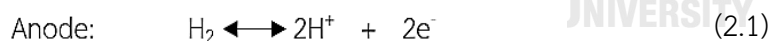
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEM) สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง และมีความน่าสนใจอย่างมากเนื่องจากมีข้อดีหลายด้านเช่น มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า สามารถเริ่มเดินเครื่องได้เร็ว มีความเสถียรในการทำงาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดโดยมีเมมเบรนอยู่ระหว่างขั้วทั้งสองหน้าที่ของเมมเบรนคือ เป็นอิเล็กโทรไลต์ หรือตัวกลางสำหรับการเคลื่อนที่ของโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดและทำหน้าที่แยกขั้วแอโนดและขั้วแคโทดไม่ให้สัมผัสกัน การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM จะมีการป้อนเชื้อเพลิง (เช่น ไฮโดรเจน) เข้าที่ขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตรงส่วนชั้น

ของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) ได้ผลิตภัณฑ์คือโปรตอนและอิเล็กตรอน โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วแคโทดเช่นกัน หลังจากนั้นโปรตอน อิเล็กตรอนและออกซิเจน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันตรงชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและความร้อน



รูปที่ 2.10 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM [10]

โดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแสดงดังนี้

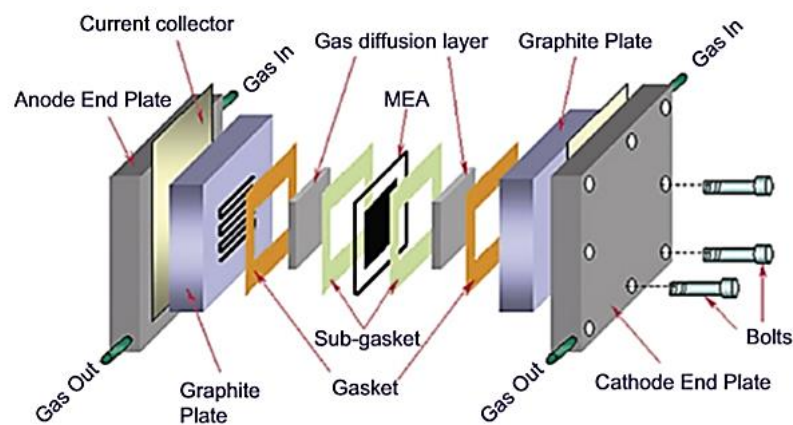


การจัดการน้ำในเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิง PEM เป็นสิ่งที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ โดยเซลล์เชื้อเพลิงต้องทำงานภายใต้สภาวะที่อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมากกว่าการระเหยของน้ำเพราะว่าเมมเบรนจะยอมให้โปรตรอนผ่านในรูปแบบสารประกอบไฮเดรตที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นอุณหภูมิในการทำงานจะต้องต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยปกติจะใช้ที่ 60 - 80 องศาเซลเซียส

เซลล์เชื้อเพลิง PEM สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน แต่โดยส่วนมากแล้วจะใช้ในยานพาหนะ

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง PEM คือไม่มีการรั่วไหลของสารเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งทำงานที่อุณหภูมิต่ำและเริ่มทำงานได้เร็ว ไม่กีดกร่อนส่วนประกอบของเซลล์ ส่วนข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ การทำงานที่อุณหภูมิต่ำและช่วงที่จำกัดทำให้การจัดการความร้อนยาก ในกรณีที่ความหนาแน่นกำลังสูง การจัดการน้ำในเซลล์เป็นสิ่งที่ทำหายเนื่องจากจะต้องสมดุลการเกิดไฮเดชันของเมมเบรนและการที่น้ำมากเกินไปทำให้เมมเบรนบวม น้ำ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ต้องใช้เชื้อเพลิงและออกซิเจนที่ไม่เจือปนด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบซัลเฟอร์ และแอมโมเนีย

โดยส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แสดงในรูปที่ 2.11 ประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง PEM [10]

## 1. ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)

เป็นส่วนที่สำคัญในเซลล์เชื้อเพลิงเพราะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ชั้นนี้จะมี ความหนาประมาณ 10 – 100 ไมโครเมตร ประกอบไปด้วยผงตัวเร่งปฏิกิริยาและ proton conductive ionomer เช่น Nafion®

## 2. ชั้นการแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer)

ชั้นนี้อยู่ทั้งสองด้านของ MEA โดยมีหน้าที่สนับสนุนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขนส่งแก๊สสารตั้งต้นและน้ำ ปกติจะเป็นผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอนเพราะมีรูพรุนที่สูง (>70%) และนำไฟฟ้าได้ดี

### 3. เมมเบรน (Membrane)

เป็นส่วนสำคัญในเซลล์เชื้อเพลิง PEM ซึ่งไม่ได้มีหน้าที่สำหรับการนำโปรตอนเพียงเท่านั้นแต่ยังมีหน้าที่แยกขั้วแอโนดและแคโทดอีกด้วย โดยปกติแล้วจะใช้เมมเบรนอย่างเช่น Nafion®

### 4. Membrane Electrode Assembly (MEA)

เมมเบรนที่ทั้งสองด้านประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งด้านแอโนดและแคโทดจะเรียกว่า MEA ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงเพราะเป็นส่วนเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดย MEA ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอน โปรตอน และแก๊สสารตั้งต้น

### 5. แผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate)

แผ่นนำไฟฟ้าสองแบบขั้วสามารถผลิตจากแผ่นโลหะหรือโลหะซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ดีและมีช่องทางการไหลสำหรับแก๊สอยู่ทั้งสองด้าน เป็นส่วนในการค้ำจุน MEA ให้มีความแข็งแรง เป็นส่วนสำหรับป้อนแก๊สสารตั้งต้นไปยังขั้ว และนำน้ำไหลออก โดยวัสดุที่นำมาทำแผ่นนำไฟฟ้าแบบของขั้วจะต้องมีสมบัติดังนี้ 1) ความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง 2) มีความเสถียรทางเคมีและเชิงกล 3) แก๊สสารตั้งต้นไม่สามารถไหลทะลุผ่านได้ 4) ราคาถูก 5) น้ำหนักเบา ปกติแล้วแผ่นนำไฟฟ้าแบบของขั้วทำมาจากแกรไฟต์และโลหะ แกรไฟต์จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงและทนต่อสารเคมีได้ดี แต่มีราคาสูงและน้ำหนักที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับโลหะเนื่องจากมีขนาดที่หนากว่าโลหะ โลหะสามารถใช้ขนาดแผ่นที่บางได้และมีค่าการนำไฟฟ้าสูงแต่โลหะมีปัญหาด้านความทนต่อการกัดกร่อน

## 2.3 แผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นชนิดพอลิเมอร์คอมพอสิต [6]

แผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นต้องมีคุณสมบัติที่ดีทั้งในด้านการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล ความเสถียร ต่อสารเคมีและสมบัติทางกายภาพอื่นๆ จากคู่มือแนวทางในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง PEM สำหรับใช้ในยานยนต์ ของ DOE สหรัฐอเมริกา ค่าสมบัติต่างๆ ของแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นแสดงในตารางที่ 2.1 [5]

ตารางที่ 2.1 เป้าหมายสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้น [5]

Characteristic	Units	Status	2020 Target
Plate cost <sup>a</sup>	\$/kW	4 <sup>b,c</sup>	3
Plate weight	kg/kW	<0.4 <sup>c,d</sup>	0.4
Plate H <sub>2</sub> permeation coefficient <sup>e</sup>	Std cm <sup>2</sup> /(sec cm <sup>2</sup> Pa) @ 80°C, 3 atm 100% RH	<2 × 10 <sup>6</sup> <sup>f</sup>	1.3 × 10 <sup>-14</sup>
Corrosion anode <sup>g</sup>	μA/cm <sup>2</sup>	no active peak <sup>h</sup>	1 and no active peak
Corrosion cathode <sup>i</sup>	μA/cm <sup>2</sup>	<0.1	1
Electrical conductivity	S/cm	>100 <sup>j</sup>	100
Areal specific resistance <sup>k</sup>	Ohm cm <sup>2</sup>	0.006 <sup>h</sup>	0.01
Flexural strength <sup>l</sup>	MPa	>34 (carbon plate)	25
Forming elongation <sup>m</sup>	See note m	20-40 <sup>n</sup>	See note m

สมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นตามเป้าหมาย ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ค่าความต้านทานเชิงผิวจำเพาะอยู่ที่ 0.01 โอห์ม-ตารางเซนติเมตร ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งอยู่ที่ 25 เมกะพาสคัลและสมบัติอื่นๆ ดังตารางที่ 2.1

แผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นโดยปกติทำมาจากแกรไฟต์และโลหะ แกรไฟต์สามารถนำไฟฟ้าได้ดีและทนต่อสารเคมีแต่มีข้อเสียคือความแข็งแรงทนทานที่ต่ำและแก๊สสามารถซึมผ่านได้อันเนื่องมาจากรูพรุนที่มากเกินไป ในส่วนของโลหะอย่างเช่น สแตนเลส และไทเทเนียม มีค่าการนำความร้อนที่ดี มีสมบัติเชิงกลที่ดี และแก๊สไม่สามารถซึมผ่านได้แต่มีข้อเสียคือการถูกกัดกร่อนได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นโดยการนำเอาพอลิเมอร์มาผสมเข้ากับแกรไฟต์หรือคาร์บอนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เป็นการเอาสมบัติของวัสดุทั้งสองมาผสมรวมกันทั้งในด้านการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์และความแข็งแรงทนทานของพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นที่ดีขึ้น

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสมกับแกรไฟต์สามารถใช้ได้ทั้งเทอร์โมเซตเรซินและเทอร์โมพลาสติก โดยเทอร์โมเซตเรซินมีข้อดีในระหว่างการเตรียมคอมพอสิตมากกว่าเทอร์โมพลาสติกคือมีความหนืดน้อยทำให้สามารถใส่ปริมาณแกรไฟต์ในปริมาณที่สูงได้ และเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี รูปร่างคงที่ และทนต่อความร้อนได้ดี ในส่วนของเทอร์โมพลาสติกไม่ค่อยได้รับความนิยมเนื่องมาจากการที่เติมแกรไฟต์ลงไปผสมได้น้อยจึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง ดังนั้น



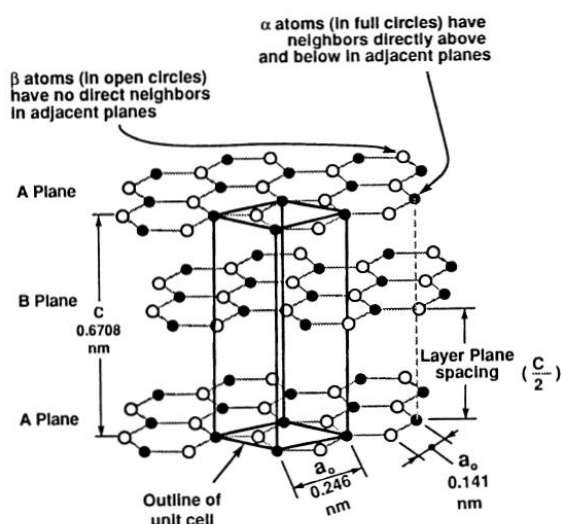
แผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้วแบบพอลิเมอร์คอมพอสิตจึงนิยมใช้เทอร์โมเซตเรซินที่สามารถผสมแกรไฟต์ได้ในปริมาณที่สูง

## 2.4 แกรไฟต์ [12]

แกรไฟต์ (Graphite) มาจากภาษากรีกที่แปลว่าการเขียน เนื่องมาจากในประวัติศาสตร์แกรไฟต์ถูกใช้ในการเขียนและวาดรูป โดยดินสอแท่งแรกถูกผลิตในอังกฤษครั้งแรกในศตวรรษที่ 15 และต่อมาในศตวรรษที่ 18 มีการค้นพบว่าแกรไฟต์เป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน

แกรไฟต์ถูกนำไปใช้อย่างหลากหลายเช่นเป็นเส้นใยที่แข็งแรง ใช้เป็นสารหล่อลื่น ก็อกสำหรับแก๊ส และเป็นตัวดูดซับแก๊ส ซึ่งสิ่งของพวกนี้ล้วนทำมาจากแกรไฟต์

โครงสร้างของแกรไฟต์ประกอบไปด้วยแผ่นระนาบที่ขนานซ้อนกันแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยวงกลมจะแสดงตำแหน่งอะตอมคาร์บอนซึ่งไม่ใช่ขนาดจริง (ความจริงแล้วอะตอมจะสัมผัสกัน) ภายในแต่ละชั้นระนาบอะตอมคาร์บอนจะเกิดพันธะกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอมในรูปแบบ hexagonal ที่ต่อกันไปอย่างไม่สิ้นสุดในระนาบสองมิติ พันธะดังกล่าวเป็นพันธะโควาเลนต์ที่มีความยาวพันธะ 0.141 นาโนเมตร และมีความแข็งแรง 524 กิโลจูลต่อโมล ส่วนอิเล็กตรอนที่เหลืออีก 1 อิเล็กตรอน (จากออร์บิทัล p ที่สามารถ delocalized ได้) เกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบ van der Waals กับกับอิเล็กตรอน (จากออร์บิทัล  $sp^3$ ) จากระนาบที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยเป็นแรงยึดเหนี่ยวแบบอ่อนมีความแข็งแรง 7 กิโลจูลต่อโมล โดยระยะระหว่างระนาบจะกว้างประมาณ 0.335 นาโนเมตร



รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ [12]

สมบัติทางกายภาพของแกรไฟต์สรุปในตารางที่ 2.2 สมบัติทางความร้อนในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 สมบัติของทางกายภาพของแกรไฟต์ [12]

---

<b>Crystalline form: hexagonal</b>	
<b>Lattice parameters:</b>	$a_0 = 0.246 \text{ nm}$ $c_0 = 0.671 \text{ nm}$
<b>Color: Black</b>	
<b>Density at 300 K, 1 atm: 2.26 g/cm<sup>3</sup> (see below)</b>	
<b>Atomic volume: 5.315 cm<sup>3</sup>/mol</b>	
<b>Sublimation point at 1 atm (estimated): 4000 K (see below)</b>	
<b>Triple point (estimated): 4200 K (see below)</b>	
<b>Boiling point (estimated): 4560 K</b>	
<b>Heat of fusion: 46.84 kJ/mol</b>	
<b>Heat of vaporization to monoatomic gas (estimated): 716.9 kJ/mol (see below)</b>	
<b>Pauling electronegativity: 2.5</b>	

---

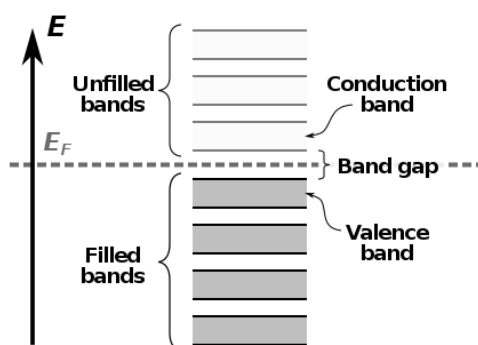
ตารางที่ 2.3 สมบัติของทางความร้อนของแกรไฟต์ [12]

---

<b>Heat of combustion <math>\Delta H_{co}</math> @ 25°C and constant pressure to form CO<sub>2</sub> gas, kJ/mol</b>	<b>393.13</b>
<b>Standard entropy <math>S^\circ</math> at 25°C, J/mol·K</b>	<b>5.697 - 5.743</b>
<b>Entropy <math>\Delta S_{298}</math>, J/mol·K</b>	<b>152.3</b>
<b>Enthalpy <math>\Delta H_{298}</math>, kJ/mol</b>	<b>716.88</b>
<b>Specific heat @ 25°C, kJ/kg·K (see below)</b>	<b>0.690 - 0.719</b>
<b>Thermal conductivity @ 25°C, W/m·K (see below)</b>	
<i>ab</i> directions	<b>398</b>
<i>c</i> direction	<b>2.2</b>
<b>Thermal expansion: see below</b>	

---

แกรไฟต์จัดเป็นธาตุกึ่งโลหะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ในแนวระนาบของแผ่นระนาบในโครงสร้าง แต่จเป็นฉนวนในทิศทางตั้งฉากกับระนาบ โดยโครงสร้างอะตอมมี Band gap อยู่ที่ 36 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ (รูปที่ 2.13) และวาเลนซ์อิเล็กตรอนตัวที่ 4 สามารถเกิดการ delocalized ได้ อยู่ในรูปแบบ partially-filled ใน conductive band ระหว่างระนาบแผ่นโครงสร้างของแกรไฟต์ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว ความต้านทานไฟฟ้าของแกรไฟต์ในแนวระนาบของโครงสร้างมีความต้านทานน้อยมีค่าประมาณ 2.5 – 5 ไมโครโอห์ม-เมตร แต่ในแนวตั้งฉากกับระนาบมีความต้านทานที่มากขึ้นอยู่ที่ประมาณ 3000 ไมโครโอห์ม-เมตร



รูปที่ 2.13 โครงสร้าง band ของสารกึ่งตัวนำ [13]

สมบัติการทนต่อสารเคมีสรุปในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความทนต่อสารเคมีของแกรไฟต์ [12]

Chemical	Resistance to Chemical Attack
<b>Acids and Acid Solutions</b>	
▪ Mineral, non-oxidizing (HCl, HCN, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , HF)	A
▪ Boiling H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	B
▪ Mineral, oxidizing (Br <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , HNO <sub>2</sub> , HClO <sub>4</sub> )	B
▪ Inorganic salts, acid-forming (alum, BF <sub>3</sub> , CuCl <sub>2</sub> , NiCl <sub>2</sub> , sulfates)	A
▪ Organic, strong (pH <3) (acetic, carbolic, formic, maleic, oxalic, phenol, picric, salicyc)	A
▪ Organic, weak (pH 3 - 7) (abietic, benzoic, citric, cresol, lactic, palmitic)	A
▪ Organic salts, acid-forming (allyl, amyl chlorides, ethyl chlorides)	A
<b>Alkalis and Alkaline Solutions</b>	
▪ Mineral, non-oxidizing (hydroxides, NaOH, hydrazine, molten Mg, KOH)	A
▪ Mineral, oxidizing (permanganate, perchlorate, perborates)	B
▪ Inorganic salts, base forming (BaSH <sub>2</sub> , borax, phosphates, NH <sub>2</sub> O <sub>8</sub> , NaHSO <sub>2</sub> , NaPO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> S)	A
▪ Organic, strong (pH >11) (ethanol amines, pyridine)	A
▪ Weak organic bases (pH 7 - 11) (aniline, soaps, urea)	A

ตารางที่ 2.4 ความทนต่อสารเคมีของแกรไฟต์ [12] (ต่อ)

Gases

- Acid ( $\text{BF}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) A
- Alkaline (wet  $\text{NH}_3$ , steam to  $300^\circ\text{C}$ ) A
- Anhydrous (dew point below  $0^\circ\text{C}$ ) ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , ethane,  $\text{F}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , methane,  $\text{O}_2$  to  $150^\circ\text{C}$ , propane,  $\text{SO}_2$ ) B
- Liquefied (air,  $\text{F}_2$ , He,  $\text{H}_2$ , methane,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) C
- Oxidizing (air above  $250^\circ\text{C}$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{O}_2$  above  $150^\circ\text{C}$ , steam above  $300^\circ\text{C}$ ) C
- Reducing (acetylene, ethane, methane) A

Melts

- Acid salts ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{PCL}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ) B
- Alkaline salts ( $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ,  $\text{LiOH}$ ,  $\text{KCN}$ , soda ash) B
- Metals (Al, Sb, Babbit, brass, Cu, Ga, Au, Mg, Hg, Ag, Sn, Zn) A
- Neutral salts ( $\text{KCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) A
- Oxidizing salts (sodium nitrate) B
- Salt solutions, neutral (baking soda,  $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$ ,  $\text{KCl}$ , sea water, sewage,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) A

Solvents

- Aliphatic (butadiene, butane, butylene, cyclohexane, fuel oil, gasoline, lubric oil, propane, propylene) A
- Aromatic (benzene, coal tar, creosote, cumene, naphthalene, petroleum, styrene, urethane) A
- Chlorinated, fluorinated ( $\text{CCl}_4$ , chlorobenzene, freons, chloroform, methyl chloride, vinyl chloride) A
- Oxygenated, sulfide (acetaldehyde, acrolein, butyl acetate, butyl alcohol,  $\text{CS}_2$ , rayon, ether, ethyl acetate, furfural, glycerine, methanol, ketones, sorbitol, vinyl acetate) A

---

(A=high, B=medium, C=low)

## 2.5 เรซินอีพ็อกซี [14]

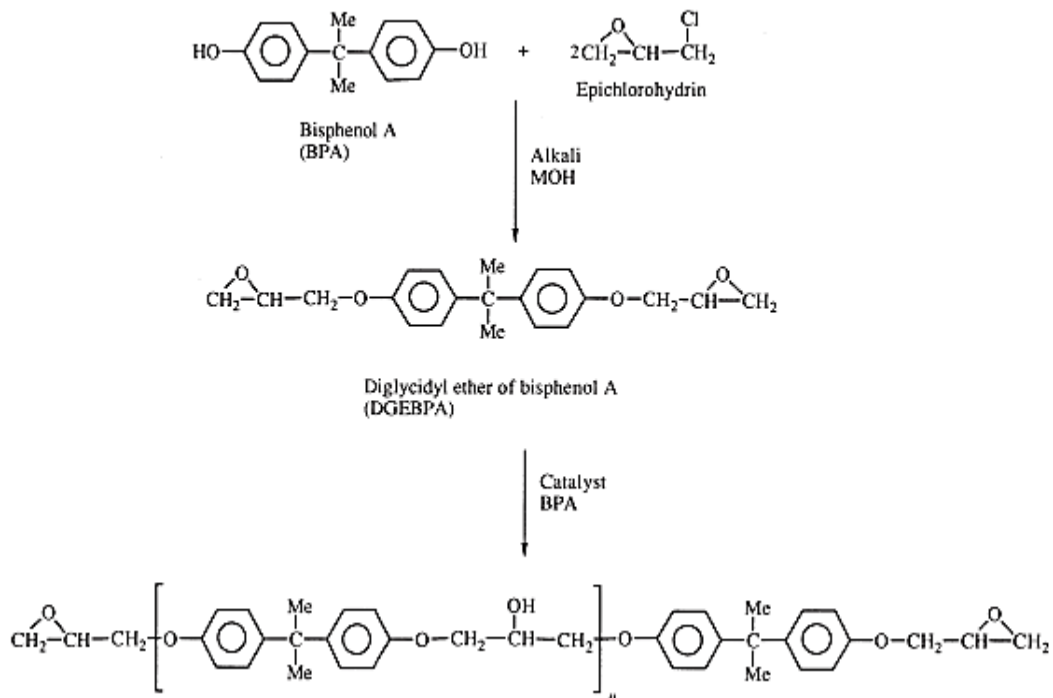
เรซินอีพ็อกซีเป็นชื่อที่ใช้เรียก prepolymer และเรซินที่ผ่านการเชื่อมขวาง (Curing) ที่มีหมู่อีพ็อกซีอยู่ ( $\text{R}-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2$ ) ในเรซินที่ผ่านการเชื่อมขวางถึงแม้หมู่อีพ็อกซีหายไปแต่ก็ยังคงเรียกว่าเรซินอีพ็อกซี

โดยผลิตภัณฑ์เรซินอีพ็อกซีมีการสังเคราะห์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1891 และมีการวางจำหน่ายในช่วงปี ค.ศ. 1940 โดย Pierre Castan ที่สวิสเซอร์แลนด์ และ Sylvan Greenlee ในสหรัฐอเมริกา โดยเรซินอีพ็อกซีสังเคราะห์มาจาก Bisphenol A และ Epichlorohydrin ซึ่งเป็นวิธีหลักในการผลิตเรซินจนถึงจนปัจจุบันนี้ (รูปที่ 2.14) เรซินอีพ็อกซีถูกใช้งานอย่างหลากหลายด้านแสดงในตารางที่ 2.5

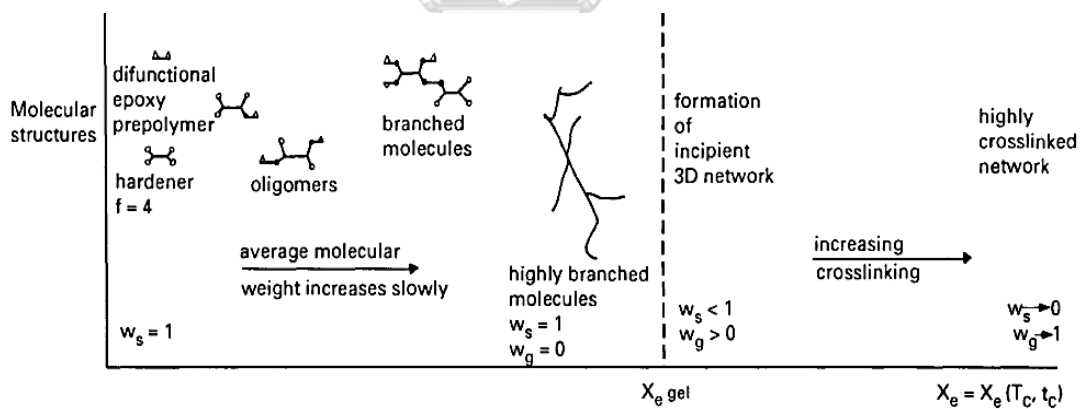
การเชื่อมขวางเรซินอีพ็อกซีทำให้เรซินอีพ็อกซีเกิดโครงสร้างเป็นร่างแหใน 3 มิติทำให้เรซินอีพ็อกซีเกิดการแข็งตัว ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของเรซินอีพ็อกซีกับตัวทำแข็ง (hardener) กระบวนการเชื่อมขวางเรซินอีพ็อกซีค่อนข้างซับซ้อนโดยมีหลายขั้นตอนแสดงในรูปที่ 2.15 ขั้นตอนแรกเป็นการเกิดปฏิกิริยาของหมู่อีพ็อกซีและหมู่เกิดปฏิกิริยาของตัวทำแข็งซึ่งทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ยังมีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยที่เล็กถึงแม้หมู่ที่เกิดปฏิกิริยาจะถูกใช้หมดไปกว่าครึ่ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นต่อเนื่องทำให้โมเลกุลเพิ่มขนาดมากขึ้นจนกระทั่งในโมเลกุลมีลักษณะเป็นกิ่งก้านที่สูง ที่จุดเส้นประในรูปคือเกิดการบวนการ gelation เมื่อโครงสร้างแบบกิ่งก้านแผ่ขยายจนทั่วทั้งชิ้นงาน ก่อนที่จะเกิด gelation ชิ้นงานสามารถละลายในสารละลายได้แต่หลังจากจุด gel (เส้นประในรูป) ชิ้นงานจะไม่สามารถละลายในสารละลายได้ ที่จุด gel โมเลกุลที่มีกิ่งก้านและขนาดเล็กสามารถละลายได้โดยส่วนของ sol และ gel มีปริมาณเท่าๆกัน กระบวนการเชื่อมขวางเกิดขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งส่วนของ sol เหลือน้อยและเข้าใกล้ 0 และชิ้นงานตัวอย่างแข็งตัวทั้งหมด

ตารางที่ 2.5 การใช้เรซินอีพ็อกซีในงานต่างๆ [14]

	[1990]		[1991]	
	1000 tonnes	%	1000 tonnes	%
Protective coatings	89	49	84	51
Electrical applications	25	14	22	13
Reinforced resins	14	7.5	13	8
Bonding and adhesives	13	7.5	12	7.25
Flooring	12	6.5	11	6.25
Tooling and casting	13	7.5	12	7.25
Other	15	8.3	12	7.25
<b>Total</b>	<b>181</b>	<b>100</b>	<b>166</b>	<b>100</b>



รูปที่ 2.14 การสังเคราะห์ prepolymer ของ epoxy resin [14]



รูปที่ 2.15 กระบวนการเชื่อมขวางของเรซินอีพ็อกซี [14]

$w_s$ =สัดส่วนของ sol ในตัวอย่าง  $w_g$ =สัดส่วนของ gel ในตัวอย่าง  $X_g$ =สัดส่วนความเข้มข้นของเรซินอีพ็อกซีที่เกิดปฏิกิริยา

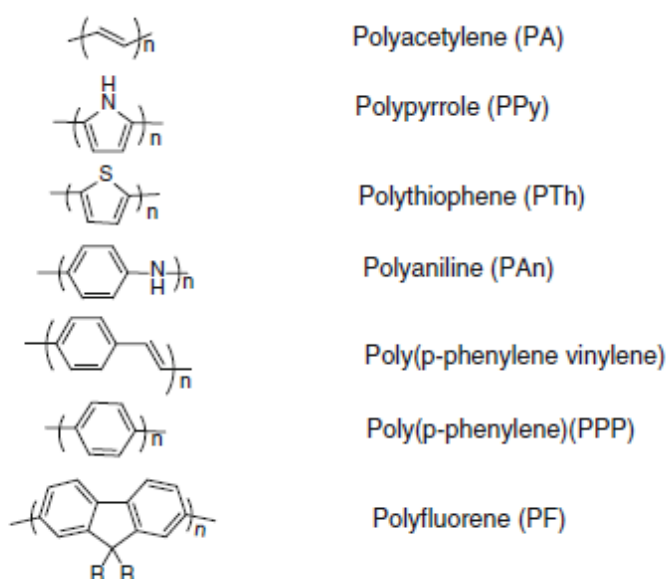
สมบัติของเรซินอีพ็อกซีแตกต่างกันตามตัวทำแข็งที่ใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วเรซินอีพ็อกซีมีความสามารถในการยึดติดที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีได้ดีและทนต่อความร้อนสูง มีความแข็งแรงทนทานมีสมบัติเชิงกลที่ดี และเป็นฉนวนทางไฟฟ้า [15]

## 2.6 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า [16]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronically conducting polymer) และพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบไอออนิก (Ionically conducting polymer) โดยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบไอออนิกเรียกว่า พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ ส่วนพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์หมายถึง พอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบ conjugate (Conjugated conducting polymer) หรือคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้ากับวัสดุที่นำไฟฟ้าได้

ในอดีตพอลิเมอร์ถูกคิดว่าเป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่ในปี ค.ศ. 1977 การค้นพบของ Mac Diarmid และคณะ ได้เปลี่ยนความคิดแบบเดิม ซึ่งพวกเขาพบว่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิอะเซททีลีน (Polyacetylene) หลังจากเจือด้วย  $AsF_5$  ได้เพิ่มความสามารถการนำไฟฟ้าขึ้น 9 เท่ามีค่าในระดับ  $10^3$  ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร หลังจากนั้นในช่วงปลายศตวรรษที่ 80 ได้มีการค้นพบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีความเสถียรคือ พอลิไพร์โรล (Polypyrrole) พอลิอะนิลีน (Polyaniline) และพอลิไทโอฟิน (Polythiophene) ทำให้งานวิจัยในด้านพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นที่โดดเด่น โดยค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ conjugate จะอยู่ในช่วงระดับ  $10^{-3} - 10^3$  ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร หลังผ่านการเจือ (Dope) ไม่ว่าจะชนิด p หรือ n

โครงสร้างของพอลิเมอร์ conjugate สายโซ่หลักของพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นแบบ conjugate คือสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่มี  $\pi$ -electron สามารถเกิดการ delocalize ได้ทั่วสายโซ่พอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ conjugate จะกลายมาเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าหลังจากการเจือ ซึ่งโครงสร้างของพอลิเมอร์ conjugate ต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.16

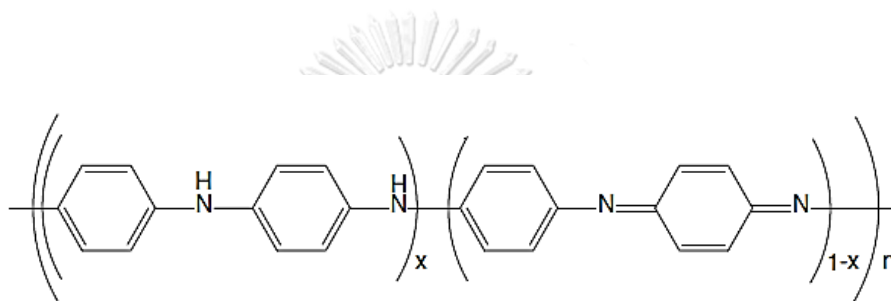


รูปที่ 2.16 โครงสร้างของพอลิเมอร์ conjugate แบบต่างชนิดกัน [16]

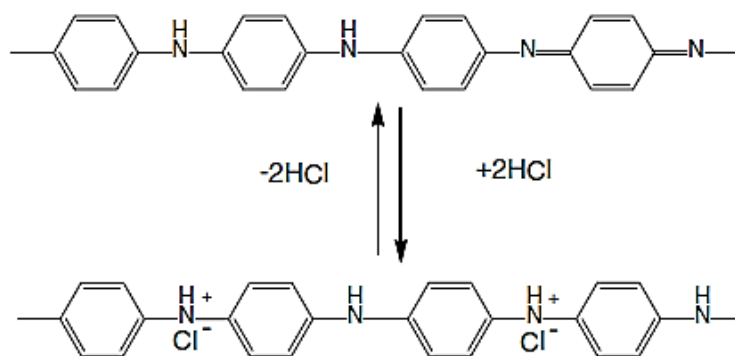
โครงสร้างสายโซ่ของพอลิอะนิลีนซึ่งมีความซับซ้อนน้อยแสดงในรูปที่ 2.17 โดยปกติแล้วโครงสร้างจะมีสามรูปแบบคือ

1. Leucoemeraldine เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 1
2. Emeraldin base เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 0.5
3. Pernigraniline เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 0

โครงสร้างของพอลิอะนิลีนในรูปที่ 2.17 คือ Leucoemeraldine ซึ่งโครงสร้างแบบ Emeraldin base จะมีความสำคัญมากสำหรับพอลิอะนิลีนที่การเจือด้วยกรดจะทำให้นำไฟฟ้าได้แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของพอลิอะนิลีน [16]

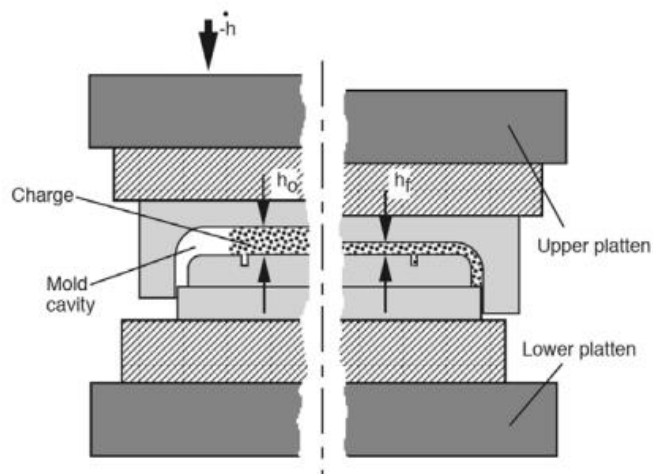


รูปที่ 2.18 การเจือด้วยกรดในพอลิอะนิลีน emeraldine base [16]



## 2.7 กระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมเซตเรซิน

กระบวนการขึ้นรูปเรซินต่างๆ นิยมทำการขึ้นรูปโดยการขึ้นรูปกดอัดแบบร้อน (Compression molding) กระบวนการนี้นิยมในการใช้ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะใหญ่ บาง น้ำหนักน้อย และมีความแข็ง โดยรูปของเครื่องแสดงในรูปที่ 2.19 [17]



รูปที่ 2.19 ภาพของเครื่อง compression molding [17]

กระบวนการอัดแบบร้อน จะนำพลาสติกเทอร์โมเซตเรซินใส่ลงในช่องแม่พิมพ์และทำการให้ความร้อนเพื่อให้รูปร่างของพลาสติกแนบลงในแม่พิมพ์ หลังจากนั้นอัดแรงดันจนแม่พิมพ์ปิดและเพิ่มความร้อนซึ่งพลาสติกจะไหลเต็มแม่พิมพ์หลังจากที่พลาสติกเกิดการเชื่อมขวางเสร็จแม่พิมพ์เปิดออกและนำชิ้นงานออกมา โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดของเสียน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นในการขึ้นรูปพลาสติก [18]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dweiri และ Sahari [19] ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตของพอลิพรอพิลีน/แกรไฟต์ (Polypropylene/Graphite) พบว่ามีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำโดยมีค่า 28 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของแกรไฟต์ และในส่วนของคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ร่วมกับแกรไฟต์พบว่า มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต ซึ่งการใช้คาร์บอนแบล็คร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ร่วมกับแกรไฟต์ร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก และพอลิพรอพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ความสามารถในการนำไฟฟ้ามีค่าถึง 35 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็น 5 เท่าของค่าที่ใช้แกรไฟต์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และพอลิพรอพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (7 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ในด้านของการศึกษาผลของการเตรียมคอมพอสิตแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือการผสมวัสดุคอมพอสิตด้วยวิธีการหลอมเหลว (Melt compounding) และการผสมวัสดุคอมพอสิตด้วยวิธีการผสมในสารละลาย (Solution blending) พบว่าการผสมพอลิพรอพิลีนกับสารตัวเติมนำไฟฟ้า (Conductive fillers) ด้วยวิธีการผสมในสารละลายจะได้คอมพอสิตที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่มากกว่า และการใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเช่น พอลิอะนิลีน ผสมกับพอลิพรอพิลีน แกรไฟต์ และคาร์บอนแบล็คพบว่าทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอันเนื่องมาจากความเสถียรทางความร้อนต่ำของพอลิอะนิลีน

Suherman และ Sahari [20] ศึกษาผลของการเติมคาร์บอนแบล็คซึ่งเป็นอนุภาคนำไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมที่ 2 ในเฟสพอลิเมอร์ของแกรไฟต์สังเคราะห์/อีพ็อกซี พบว่าการใช้คาร์บอนแบล็คร้อยละ 10 โดยปริมาตร ร่วมกับแกรไฟต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร และอีพ็อกซีร้อยละ 30 โดยปริมาตร ให้การนำไฟฟ้าในแนวระนาบ 150 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าในแนวผ่านระนาบ 55 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าความทนต่อการหักงอ 38.8 MPa โดยการใช้คาร์บอนแบล็คเป็นสารตัวเติมที่ 2 ทำให้เกิดโครงข่ายการนำไฟฟ้าที่เติมเต็มช่องว่างระหว่างแกรไฟต์สังเคราะห์และเฟสพอลิเมอร์

Jia และคณะ [8] ศึกษาและเตรียมคอมพอสิตนำไฟฟ้าของอีพ็อกซี-แอนไฮไดรด์ ที่เติมด้วยพอลิอะนิลีน-กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค มีการศึกษา 2 รูปแบบของพอลิอะนิลีน-กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค (Dodecylbenzenesulfonic acid (DBSA)) โดยแบบแรกคือแบบผง (Powder) มีการใช้กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคตามอัตราส่วนพอดี และแบบที่ 2 คือแบบเพสต์ (Paste) ซึ่งมีการใช้กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเกินพอ พบว่าการใช้กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเกินพอสามารถปรับปรุงการกระจายตัวของพอลิอะนิลีน-กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคในเรซินได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการที่มีกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคมากเกินพอจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (Curing reaction) ของอีพ็อกซี ซึ่งปัญหาดังนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้ปริมาณของตัวเร่ง (Accelerator) เพิ่มมากขึ้น และ

ในส่วนความสามารถในการนำไฟฟ้าพบว่าคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน-กรดโตนิกเบนซีนซัลโฟนิคในรูปแบบเพสต์นำไฟฟ้าได้ดีกว่ารูปแบบพาวเดอร์

Radhakrishnan และคณะ [21] ศึกษาคอมพอสิตของพอลิฟีนิลีนซัลไฟด์-แกรไฟต์ (Polyphenylene sulfide-graphite) และพอลิอีเทอร์ซัลโฟน-แกรไฟต์ (Polyether sulfone-graphite) สำหรับประยุกต์ใช้ทำแผ่นนำไฟฟ้าแบบของแข็ง โดยศึกษาผลของการเติมคาร์บอนแบล็คที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลงไปพบว่าทำให้ความต้านทานของคอมพอสิตทั้งสองชนิดลดลง โดยที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของแกรไฟต์ พบว่าความต้านทานมีค่าต่ำอยู่ในระดับ 0.1 โอห์ม และในการศึกษาด้านวิธีการเตรียมที่มีผลต่อแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) ของความสามารถในการนำไฟฟ้า พบว่าการเตรียมโดยผสมวัสดุองค์ประกอบในสารละลายจะมีค่าแอนไอโซโทรปีที่ต่ำกว่าการผสมแบบผงแห้ง



### บทที่ 3

#### เครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ผงแกรไฟต์สังเคราะห์	บริษัท Inoxia Ltd
2. เรซินอีพ็อกซี(Epoxy. No. 105)	บริษัทรุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาสจำกัด
3. สารช่วยแข็งตัวของอีพ็อกซี (200B)	บริษัทรุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาสจำกัด
4. กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิก ( $C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3H$ )	บริษัท Sigma-Aldrich
5. อะนิลีนมอนอเมอร์ ( $C_6H_5NH_2$ )	บริษัท Ajax Finechem
6. แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต ( $(NH_4)_2S_2O_8$ )	บริษัท Ajax Finechem
7. เมทานอล ( $CH_3OH$ ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก	บริษัท Qrec
8. แอซีโตน ( $C_3H_6O$ ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก	บริษัท Qrec
9. น้ำกลั่น	
10. น้ำแข็ง	

##### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เครื่องปั่นกวน (Overhead stirrer) รุ่น RW20.n ยี่ห้อ KIKA work
3. เครื่องอัดด้วยความร้อน (Compression molding) รุ่น LP20 ยี่ห้อ Labtech
4. เครื่องปั่นรุ่น BL-002 ยี่ห้อ AJ
5. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) รุ่น HY 3002 ยี่ห้อ COMMUE
6. มัลติมิเตอร์ (Multi-meter) Model RM-15 Sangchai meter
7. เครื่องวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด (Four point probe) รุ่น RM3-AR ยี่ห้อ JANDEL
8. Scanning electron microscope (SEM) รุ่น X-MaxN 50 ยี่ห้อ JEOL
9. Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) รุ่น Spectrum one ยี่ห้อ Perkin Elmer
10. เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้ง รุ่น Instron 5882 ยี่ห้อ Instron
11. ตู้อบ
12. Suction pump
13. กระดาษกรอง
14. อะลูมิเนียม ฟอยล์

15. ปีกเกอร์และอ่างสแตนเลส
16. ปากกาหนีบชิ้นงาน
17. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ (100 องศาเซลเซียส)

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การศึกษาคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี)

งานวิจัยส่วนแรกศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อสมบัติคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี ทั้งสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ตัวแปรที่ศึกษาคือ

- ปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิต
- ชนิดของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป
- ภาวะในการอัดขึ้นรูป เช่น ความดัน อุณหภูมิ และเวลาในการอัดขึ้นรูป

##### 3.3.1.1 การเตรียมคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี)

การเตรียมคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีมีขั้นตอนดังนี้

1. นำแกรไฟต์ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
2. ผสมแกรไฟต์ เรซินอีพ็อกซี (Epoxy No. 105) และสารทำให้เรซินอีพ็อกซีแข็งตัว (200B) โดยอัตราส่วนเรซินอีพ็อกซีต่อสารทำให้แข็งตัวคือ 2 ต่อ 1 กรัม โดยใช้เครื่องปั่นเป็นเวลา 5 นาที จะได้ผงของคอมพอสิตที่มีลักษณะเปียก
3. นำผงคอมพอสิตที่ได้ (10 กรัม) ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาด 127 x 12.7 x 3.2 มิลลิเมตร โดยเติมผงคอมพอสิตลงในแม่พิมพ์และอัดขึ้นรูปแบบร้อนด้วยเครื่อง compression molding ที่ภาวะที่ศึกษา
4. หลังจากการอัดขึ้นรูปแบบร้อนแล้ว ทำการลดอุณหภูมิชิ้นงานโดยการอัดแบบเย็นเป็นเวลา 5 นาที (โดยเครื่อง compression molding มีระบบอัดแบบเย็นซึ่งมีระบบลดอุณหภูมิแบบใช้น้ำ)

##### 3.3.1.2 การศึกษาปริมาณแกรไฟต์ที่เหมาะสมในคาร์บอนคอมพอสิต

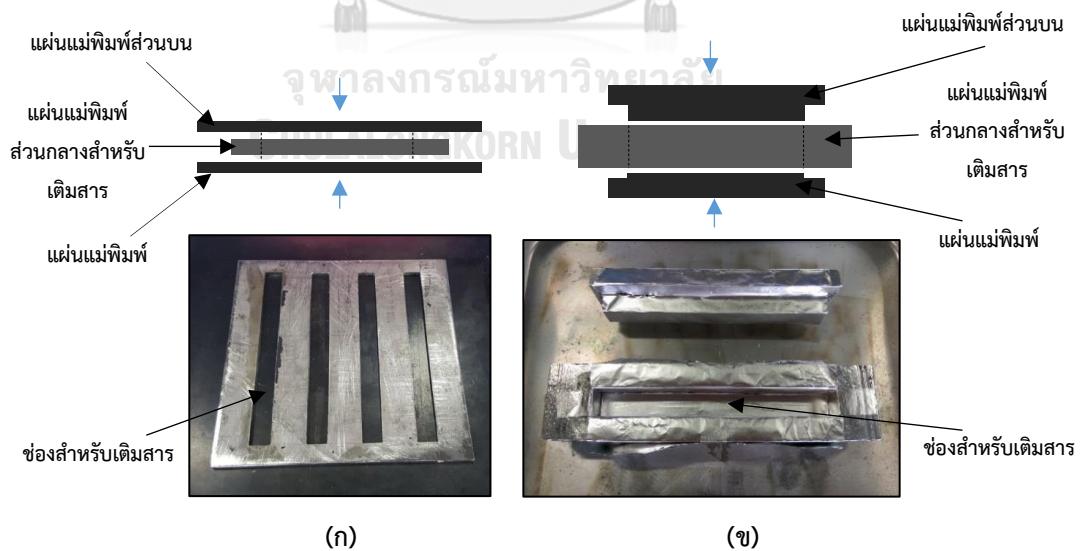
เนื่องจากแกรไฟต์เป็นสารนำกระแสไฟฟ้าของคอมพอสิตและเรซินอีพ็อกซีเป็นส่วนที่ช่วยให้คอมพอสิตแข็งแรง ดังนั้นจึงต้องศึกษาปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้คอมพอสิตมีค่าการนำกระแสไฟฟ้าที่ดีและมีความแข็งแรงทนทาน โดยแปรผันปริมาณแกรไฟต์และเรซินอีพ็อกซีตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนแกรไฟต์และเรซินอีพ็อกซีในคอมพอสิต

ตัวอย่าง	ปริมาณแกรไฟต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เรซินอีพ็อกซี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Gr/E (60/40)	60	40
Gr/E (65/35)	65	35
Gr/E (70/30)	70	30
Gr/E (75/25)	75	25
Gr/E (80/20)	80	20
Gr/E (85/15)	85	15
Gr/E (90/10)	90	10

Gr=แกรไฟต์ E=เรซินอีพ็อกซี

เมื่อผสมแกรไฟต์และเรซินอีพ็อกซีตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 จนเข้าเป็นเนื้อเดียวกันก็นำมาขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สองชนิดคือแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าและแม่พิมพ์แบบแผ่น (รูปที่ 3.1) โดยใช้ความดันที่ 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำคอมพอสิตเก็บไว้ในที่ปลอดความชื้นเพื่อเตรียมเอาไปทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ ความเป็นรูปพรุนและความหนาแน่น



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์ทั้งสองแบบ (ก) แม่พิมพ์แบบแผ่น (ข) แม่พิมพ์แบบลูกเต๋า

### 3.3.1.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคาร์บอนคอมพอสิต

การศึกษาในส่วนนี้ใช้คอมพอสิตที่มีอัตราส่วนแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนักและเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และนำมาอัดขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าที่ภาวะต่างกัณดังตารางที่ 3.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรในการอัดขึ้นรูปแต่ละตัวแปร หลังจากนั้นนำคอมพอสิตเก็บไว้ในที่ปิด ความชื้นเพื่อเตรียมเอาไปทดสอบสมบัติสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ ความเป็นรูพรุนและความหนาแน่น

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนแกรไฟต์และเรซินอีพ็อกซีในคอมพอสิต

ตัวอย่าง	ภาวะในการขึ้นรูป		
	ความดัน (เมกะพาสคัล)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
P12	12	130	15
P13	13	130	15
P14	14	130	15
P15	15	130	15
P16	16	130	15
T100	15	100	15
T130	15	130	15
T160	15	160	15
T190	15	190	15
t5	15	130	5
t15	15	130	15
t30	15	130	30
t60	15	130	60

P= ความดัน T= อุณหภูมิ t= เวลา

### 3.3.2 การศึกษาผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีนที่เจือด้วยกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค (DBSA-PANI) ต่อสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต

งานวิจัยส่วนที่สองศึกษาผลของปริมาณ DBSA-PANI ต่อสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) ดังต่อไปนี้

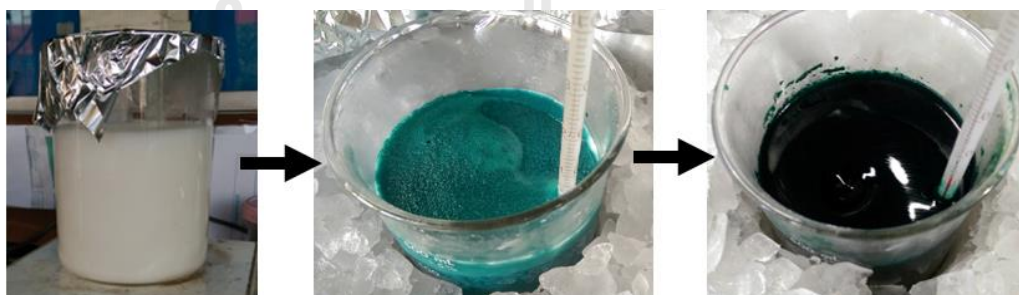
### 3.3.2.1 การเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ DBSA-PANI

สังเคราะห์ DBSA-PANI ตามวิธีการของ Haba และคณะ [22] มีขั้นตอนดังนี้

1. ผสมอะนิลีน (6 กรัม) และ DBSA (21.6 กรัม) ในน้ำกลั่น (1200 กรัม) ปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้สารเชิงซ้อนอะนิลีนียม-DBSA สีขาวซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ในน้ำ
2. นำสารผสมที่ได้มาลดอุณหภูมิลงที่ประมาณ 0 องศาเซลเซียส เติมสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (15 กรัม ในน้ำ 50 กรัม) โดยค่อยๆ หยดลงไปจนหมดแล้วจึงปั่นกวนทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ซึ่งการเปลี่ยนสีของสารในปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 3.2 เมื่อสารเปลี่ยนสีเป็นเขียวดำแล้วจึงหยุดปั่นกวน
3. นำเมทานอลเติมลงไปในของผสมดังกล่าว (เขียวดำ) ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร
4. แยกส่วนที่ตกตะกอนมากรองแล้วล้างด้วยเมทานอล โดยใช้เครื่อง Suction pump
5. นำตะกอน DBSA-PANI อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
6. นำไปบดให้มีขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น

ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ DBSA-PANI จะใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเพื่อบ่งชี้ว่าเป็น DBSA-PANI การเตรียมตัวอย่างจะนำผง DBSA-PANI อัดผสมกับ KBr แล้วจึงนำไปทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนของสารผสมในระหว่างการสังเคราะห์ DBSA-PANI



### 3.3.2.2 การเตรียมสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (DBSA-PANI/ แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี)

1. อบแกรไฟต์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
2. ผสมเรซินอีพ็อกซี (Epoxy No. 105) และผง DBSA-PANI ที่อัตราส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 3.3 โดยใช้เครื่องปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
3. ผสมแกรไฟต์ DBSA-PANI/Epoxy ที่ได้จากข้อ 2 และสารทำให้เรซินอีพ็อกซีแข็ง (200B) (อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเรซินอีพ็อกซีและสารทำให้เรซินอีพ็อกซีแข็งตัวคือ 2 : 1) โดยใช้เครื่องปั่นเป็นเวลา 5 นาที
4. นำผง DBSA-PANI/ แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาด 127 x 12.7 x 3.2 มิลลิเมตร ในแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าและอัดขึ้นรูปแบบร้อนที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
5. หลังจากการอัดขึ้นรูปแบบร้อนแล้ว ทำการลดอุณหภูมิชิ้นงานโดยการอัดแบบเย็นเป็นเวลา 5 นาที (โดยเครื่อง compression molding มีระบบอัดแบบเย็นซึ่งมีระบบลดอุณหภูมิแบบใช้น้ำ)
6. ทดสอบสมบัติของคอมพอสิตของ DBSA-PANI/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีได้แก่ ทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ ความเป็นรูพรุน ความหนาแน่น และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนแกรไฟต์ เรซินอีพ็อกซีและ DBSA-PANI ในคอมพอสิต

ตัวอย่าง	ปริมาณแกรไฟต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณเรซินอีพ็อกซี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณ DBSA-PANI (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
DBSA-PANI 0.5	85	14.5	0.5
DBSA-PANI 1	85	14	1
DBSA-PANI 2	85	13	2
DBSA-PANI 3	85	12	3
DBSA-PANI 4	85	11	4
DBSA-PANI 5	85	10	5

### 3.3.3 การทดสอบสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต

คอมพอสิตที่เตรียมได้ทุกชิ้นงานจะนำมาทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าเพื่อหาความสามารถในการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกลเพื่อทดสอบความแข็งแรงทนทาน การดูดซึมน้ำและรูพรุนของชิ้นงาน ความหนาแน่น และลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยวิธีการทดสอบสมบัติต่างๆ เป็นดังนี้

#### 3.3.3.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำกระแสไฟฟ้าจะวัด 2 แบบคือ ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน ดังนี้

##### 1. การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบ

การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบโดยใช้เทคนิคการวัดแบบ four-point probe โดยใช้เครื่อง four-point probe ของบริษัท JANDEL รุ่น RM3-AR ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้กระแส 99.99 มิลลิแอมแปร์ เพื่อวัดค่าความต่างศักย์และนำมาคำนวณเพื่อหาค่าความการนำไฟฟ้าจากสมการที่ (3.1)

$$\text{Conductivity} = (C.D. \times I) / (2 \times \pi \times s \times \Delta V) \quad (3.1)$$

ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) = มีหน่วยเป็นซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

C.D. = แพลกเตอร์ในการปรับค่าให้ถูกต้องเนื่องจากความหนาของชิ้นงานทดสอบ

S = ระยะห่างระหว่าง probe มีค่าคือ 1 มิลลิเมตร

$\Delta V$  = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)

I = กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าชิ้นงาน (มิลลิแอมแปร์)



รูปที่ 3.3 four-point probe ของบริษัท JANDEL รุ่น RM3-AR

## 2. การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน

การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านสามารถวัดได้จากวิธีการวัดค่าความต้านทานพื้นผิวเฉพาะ (Areal specific resistance : ASR) โดยรูปแบบเครื่องมือในการวัดแสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้ชิ้นงานที่มีขนาด  $1 \times 1.3 \times 0.3$  เซนติเมตร แล้วประกบสองข้างด้วยผ้าคาร์บอนและขั้วทองแดงโดยใช้ปากกาจับชิ้นงานในการกดอัด หลังจากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วทองแดงแล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์แล้วนำมาคำนวณในสมการ (3.4) และ (3.5) [23]

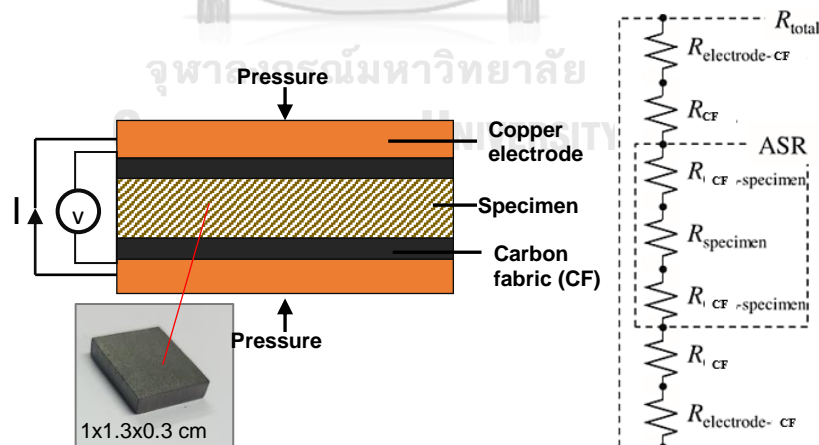
$$R_{\text{total}} = 2R_{\text{electrode-carbon fabric}} + 2R_{\text{carbon fabric}} + 2R_{\text{carbon fabric-specimen}} + R_{\text{specimen}} \quad (3.2)$$

$$R_{\text{system}} = 2R_{\text{electrode-carbon fabric}} + 2R_{\text{carbon fabric}} \quad (3.3)$$

$$\text{ASR} = (R_{\text{total}} - R_{\text{system}}) \times A = (2R_{\text{carbon fabric-specimen}} + R_{\text{specimen}}) \times A \quad (3.4)$$

$$\text{ค่าการนำไฟฟ้าทะลุผ่าน} = (\text{ความหนาของชิ้นงาน}) / (\text{ASR}) \quad (3.5)$$

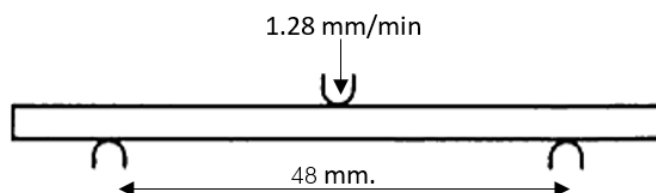
โดย  $R_{\text{total}}$  เป็นความต้านทานในขณะที่มีชิ้นงาน ส่วน  $R_{\text{system}}$  เป็นความต้านทานของอุปกรณ์ทั้งหมดโดยที่ไม่มีชิ้นงาน การหาค่าความต้านทานสามารถหาได้จากการป้อนกระแส 0.1 - 2.0 แอมแปร์ผ่านผิวหน้าของชิ้นงานที่มีพื้นที่  $A$  พร้อมกับวัดความต่างศักย์ที่ได้แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าแล้วหาค่าความต้านทานจากความชันของกราฟ



รูปที่ 3.4 แผนผังอุปกรณ์ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน

### 3.3.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตจะทดสอบโดยการโค้งงอแบบสามจุด (3 points bending) เพื่อหาค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (flexural strength) ซึ่งทดสอบโดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM-D790-03 [24] ซึ่งชิ้นที่ใช้ทดสอบจะมีขนาด กว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 127 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร โดยใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 1.28 มิลลิเมตรต่ออนาที และช่วงความยาว 48 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางตำแหน่งของชิ้นงานขณะทดสอบ 3 points bending

### 3.3.3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

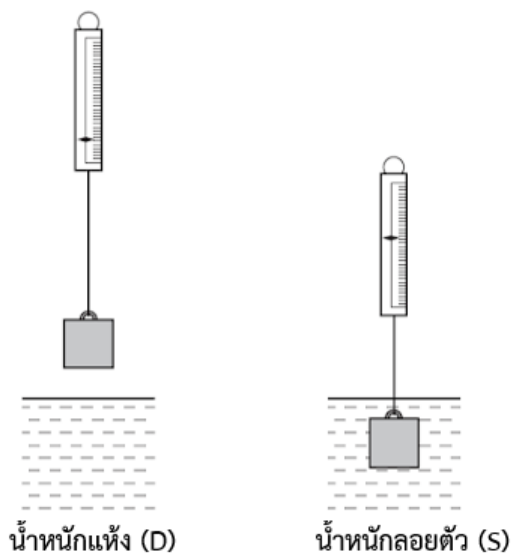
การวัดค่าดูดซึมน้ำของคอมพอสิตจะใช้วิธีการตาม ASTM D570-98 [25] โดยนำชิ้นงานคอมพอสิตมาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปแช่และบันทึกน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นให้ท่วมชิ้นงานทั้งหมดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผ้าฝ้ายแห้งมาซับน้ำส่วนเกินออกจากชิ้นงานแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเปียกบันทึกค่า ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำสามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = (\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}) / \text{น้ำหนักแห้ง} \times 100 \quad (3.6)$$

### 3.3.3.4 การทดสอบความเป็นรูพรุน

การหาความเป็นรูพรุนในชิ้นงานคอมพอสิตทดสอบโดยใช้วิธีตาม ASTM C20-00 [26] ขั้นตอนแรกนำชิ้นงานคอมพอสิตไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนักแห้ง (D) หลังจากนั้นนำชิ้นงานคอมพอสิตต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้แห้งจนอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องแล้วนำไปแช่ในน้ำต่อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักในน้ำเพื่อหาน้ำหนักลอยตัว (S) (สามารถดูได้จากรูปที่ 3.6) และต่อจากนั้นนำชิ้นงานมาแช่หยดน้ำออกจากผิวชิ้นงานด้วยผ้าไหมหรือผ้าฝ้ายที่ชุ่มด้วยน้ำ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักอิมมัตว (W) แล้วนำข้อมูลน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาการรูพรุนปรากฏ (apparent porosity : P) จากสมการ (3.7)

$$P, \% = (W - D) / (W - S) \times 100 \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบการชั่งน้ำหนักทั้งสองแบบ

#### 3.3.3.4 การวัดความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่นของชิ้นงานคอมพอสิตสามารถทำได้โดยนำชิ้นงานไปอบแห้งที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นวัดปริมาตรโดยการแทนที่น้ำของชิ้นงานแล้วนำค่าน้ำหนักแห้งและปริมาตรไปคำนวณหาความหนาแน่นจากสมการที่ (3.8)

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน}}{\text{ปริมาตรชิ้นงาน}} \quad (3.8)$$

#### 3.3.3.5 ศึกษาสัณฐานวิทยา

คอมพอสิตที่เตรียมได้จะถูกนำมาทำให้แตกหักแล้วนำผิวบริเวณที่แตกหักไปเคลือบด้วยทอง และส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตที่เตรียมได้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่จะศึกษาผลของการเติมพอลิอะนิลีนที่เจือด้วยกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกต่อสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมได้ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกศึกษาคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีเพื่อพิจารณาว่าตัวแปรใดบ้างมีผลต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยศึกษาทั้งหมด 5 ตัวแปร (ปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิต ชนิดแม่พิมพ์ ความดัน อุณหภูมิ และเวลาในการขึ้นรูป) ส่วนที่สองศึกษาผลของพอลิอะนิลีนที่เจือด้วยกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิต ตัวแปรที่ศึกษาคือปริมาณพอลิอะนิลีนที่เจือด้วยกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกที่เติมลงในคอมพอสิต จากนั้นนำคอมพอสิตต่างๆ ที่เตรียมได้มาศึกษาค่าการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และลักษณะสัณฐานวิทยา

#### 4.1 สมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี)

##### 4.1.1 ผลของปริมาณอัตราส่วนแกรไฟต์ในคอมพอสิตและรูปแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปคอมพอสิต

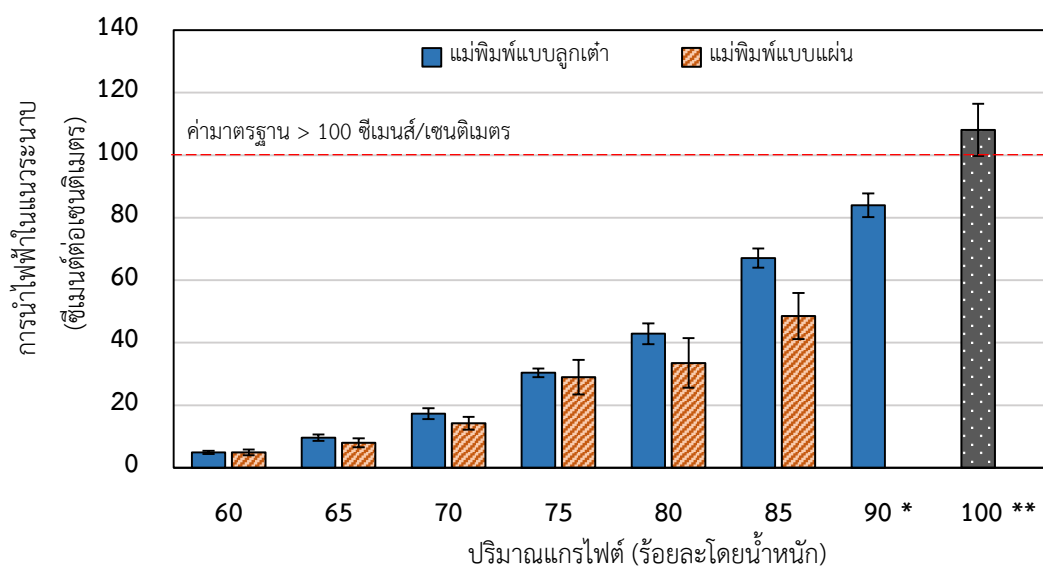
ผสมผงแกรไฟต์และเรซินอีพ็อกซีจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยแปรผันปริมาณแกรไฟต์ในช่วงร้อยละ 60 – 90 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยการกดอัดแบบร้อนโดยใช้แม่พิมพ์ 2 แบบคือ แม่พิมพ์แบบแผ่น (Plate mold) และแม่พิมพ์แบบลูกเต๋า (Dice mold) ที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

##### 4.1.1.1 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่าน

นำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมาวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่านพบว่า เมื่อปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทั้งการนำไฟฟ้าในแนวระนาบ (รูปที่ 4.1) และแนวทะลุผ่าน (รูปที่ 4.2) เนื่องจากเรซินอีพ็อกซีเป็นพลาสติกเทอร์โมเซตที่ไม่นำไฟฟ้า ดังนั้นในคอมพอสิตที่มีปริมาณเรซินอีพ็อกซีมากจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงจากการที่เรซินอีพ็อกซีเข้าไปเชื่อมระหว่างอนุภาคแกรไฟต์จึงส่งผลให้การส่งผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างอนุภาคแกรไฟต์ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดแม่พิมพ์ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตที่มีการใช้แกรไฟต์ตั้งแต่ร้อยละ 60 – 90 โดยน้ำหนัก พบว่าคอมพอสิตที่เตรียมโดยแม่พิมพ์แบบแผ่นมีค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบอยู่ที่ 4.87 – 48.54 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านอยู่ในช่วง

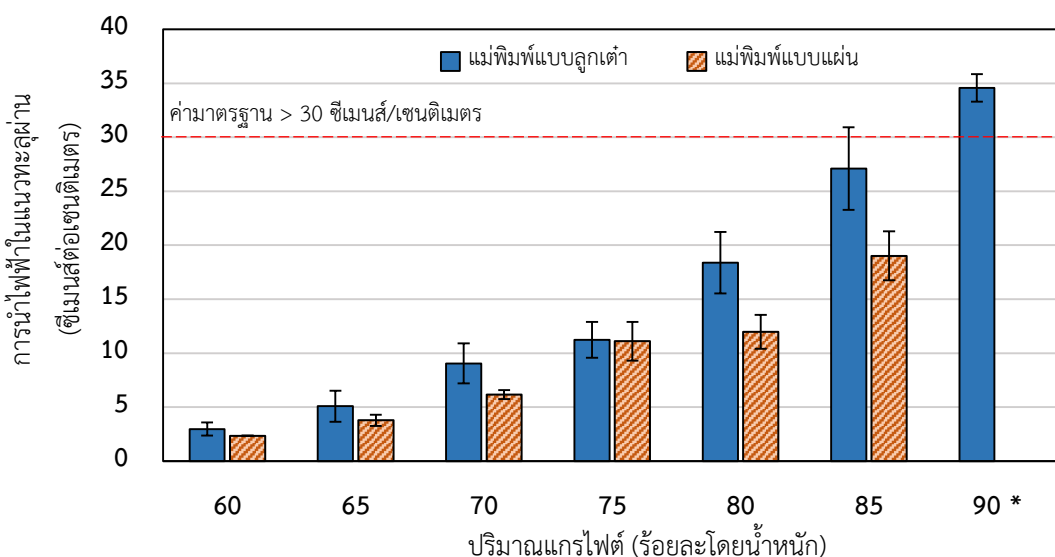
2.34 – 19.02 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนคอมพอสิตที่เตรียมโดยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋ามีค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบอยู่ 4.92 - 83.64 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านอยู่ในช่วง 2.97 – 34.58 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 สัดส่วนแกรไฟต์ที่ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดมีค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบ 83.64 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และแนวทะลุผ่าน 34.58 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร โดยใช้แม่พิมพ์แบบลูกเต๋ในการขึ้นรูป แต่ไม่สามารถขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบแผ่นได้



**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

\* แม่พิมพ์แบบแผ่นไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนักได้

\*\* การอัดขึ้นรูปผงแกรไฟต์ใช้ความดันในการอัดที่ 60 เมกะพาสคัลที่อุณหภูมิห้อง



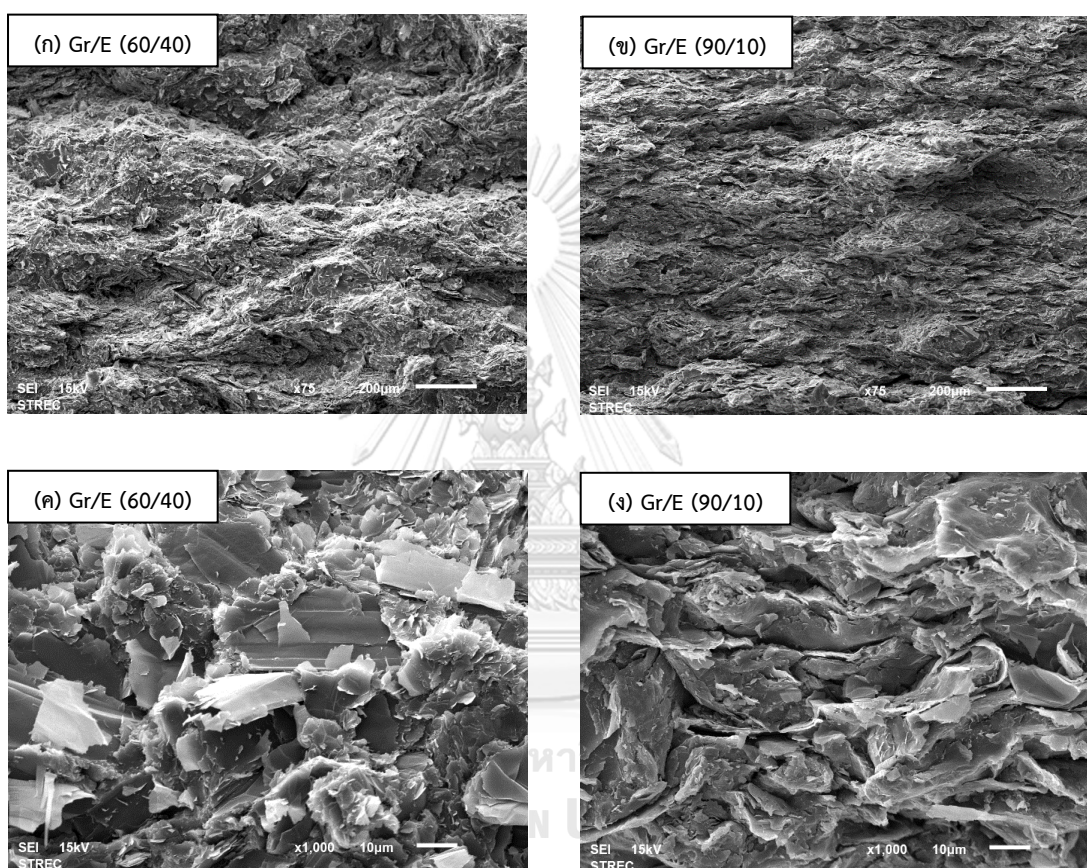
**รูปที่ 4.2** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและปริมาณไครไฟต์ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที  
\* แม่พิมพ์แบบแผ่นไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีไครไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนักได้

จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดของคอมพอสิตที่มีปริมาณไครไฟต์ร้อยละ 60 และ 90 โดยน้ำหนัก จากรูปสามารถสังเกตเห็นว่าคอมพอสิตที่มีปริมาณไครไฟต์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก มีลักษณะพื้นผิวที่เรียกว่าที่ปริมาณไครไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีปริมาณเรซินอีพ็อกซีคลุมผิวมากกว่า

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้แม่พิมพ์แบบลูกเต๋าในการขึ้นรูปชิ้นงานทำให้ชิ้นงานที่ได้ มีค่าการนำไฟฟ้าทั้งในแนวระนาบและแนวทะลุผ่านมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบแผ่น และผลดังกล่าวจะเด่นชัดขึ้นเมื่อมีการใช้ไครไฟต์ในปริมาณที่สูงในคอมพอสิต การที่แม่พิมพ์แบบลูกเต๋ามีประสิทธิภาพในการอัดขึ้นรูปดีกว่าแม่พิมพ์แบบแผ่นเนื่องจากในกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบแผ่น เนื้อคอมพอสิตทั้งหมดไม่สามารถอัดเข้าช่องของแม่พิมพ์ได้ทั้งหมด ซึ่งทำให้นเนื้อคอมพอสิตบางส่วนล้นออกนอกแม่พิมพ์แต่แม่พิมพ์แบบลูกเต๋าสามารถอัดเนื้อคอมพอสิตเข้าช่องแม่พิมพ์ได้ทั้งหมด ดังนั้นคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าดังกล่าวจึงมีเนื้อของชิ้นงานที่แน่นกว่าทำให้อนุภาคไครไฟต์อยู่ชิดกันได้มากกว่าจึงสามารถการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า ในส่วนของคอมพอสิตที่มีปริมาณไครไฟต์สูง ในช่วงการเตรียมสำหรับการอัดขึ้นรูปพบว่าเนื้อของผสมไครไฟต์กับเรซินอีพ็อกซีมีลักษณะเป็นผงที่แห้งเนื่องจากปริมาณเรซินอีพ็อกซีน้อยทำให้ผงของผสมดังกล่าวมีปริมาตรมากกว่าปริมาตรของช่องแม่พิมพ์แบบแผ่นจึงทำให้การเติมผงคอมพอสิตเข้าไปเพื่ออัดขึ้นรูปทำได้ไม่ดีเท่าแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าที่สามารถเติมผงคอมพอสิตลงไปช่องแม่พิมพ์ได้ทั้งหมด เมื่อนำคอมพอสิตที่มี



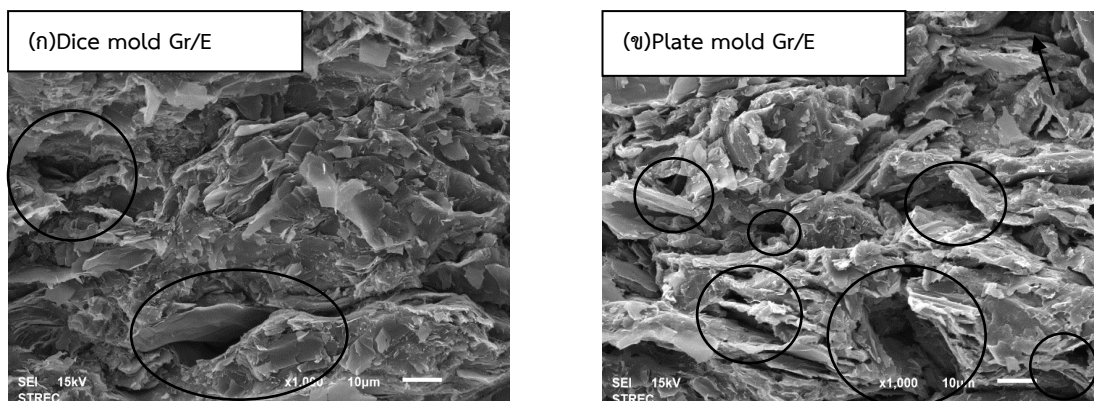
ปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก จากการใช้แม่พิมพ์ทั้งสองชนิดขึ้นรูปมาเปรียบเทียบลักษณะผิวแตกหักดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าเนื้อคอมพอสิตอัดตัวกันแน่นส่งผลให้ช่องว่างหรือรูพรุนในเนื้อคอมพอสิตน้อยกว่าคอมพอสิตที่อัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบแผ่น ดังนั้นอนุภาคแกรไฟต์ในคอมพอสิตจึงอยู่ชิดกันมากกว่าทำให้อิเล็กทรอนิกส์ไหลผ่านได้ดีจึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิต

(ก) แกรไฟต์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และ (ข) แกรไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 75 เท่า

(ค) แกรไฟต์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และ (ง) แกรไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

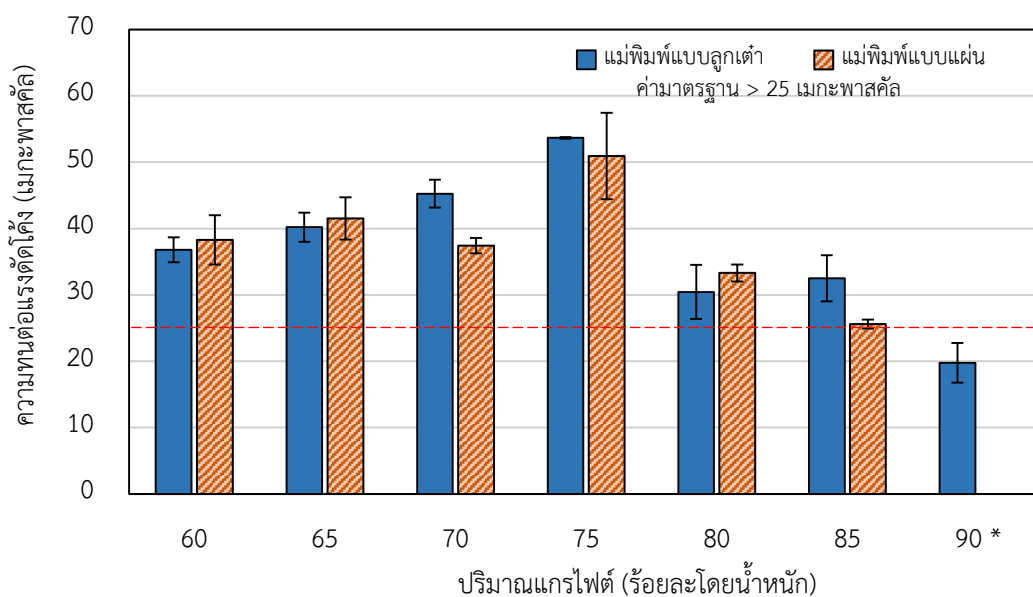


**รูปที่ 4.4** ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิตโดยมีแกรไฟต์อยู่ที่ ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก (ก) ใช้แม่พิมพ์แบบลูกเต๋าในการขึ้นรูป (ข) ใช้แม่พิมพ์แบบแผ่นในการขึ้นรูป (วงกลมชี้ให้เห็นถึงรูพรุนในคอมพอสิต)

#### 4.1.1.2 สมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกลของคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) ใช้การทดสอบการโค้งงอแบบสามจุด (3-point bending test) ตามมาตรฐาน ASTM D790-03

ผลการทดสอบพบว่าค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแกรไฟต์ในช่วงของแกรไฟต์ร้อยละ 60 ถึง 75 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.5) แต่จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแกรไฟต์มากกว่าร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก โดยในช่วงแรกนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณแกรไฟต์จะเสมือนเพิ่มส่วนที่ช่วยรับแรงของคอมพอสิตจึงทำให้สามารถทนต่อแรงที่ใช้ในการดัดโค้งได้ดีแต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแกรไฟต์มากกว่าร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ความสามารถในการรับแรงดัดโค้งมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเรซินอีพ็อกซีที่เป็นสารในการยึดเหนี่ยวอนุภาคแกรไฟต์เข้าด้วยกันมีปริมาณน้อยลง ดังนั้นเนื้อคอมพอสิตจึงมีความเปราะมากขึ้นทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [7] จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดัดโค้งทุกคอมพอสิตมีค่าทนต่อแรงดัดโค้งมากกว่า 25 เมกะพาสคัล ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้า ยกเว้นคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก



**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอลสิต โดยคอมพอลสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

\* แม่พิมพ์แบบแผ่นไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนักได้

เมื่อเปรียบเทียบผลของการอัดขึ้นรูปชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทั้งสองแบบพบว่าคอมพอลสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์น้อยกว่าร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ยังคงมีสมบัติการทนต่อแรงดัดโค้งที่ผ่านค่ามาตรฐาน แต่ในคอมพอลสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์สูงหรือมากกว่าร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก สมบัติการทนต่อแรงดัดโค้งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน

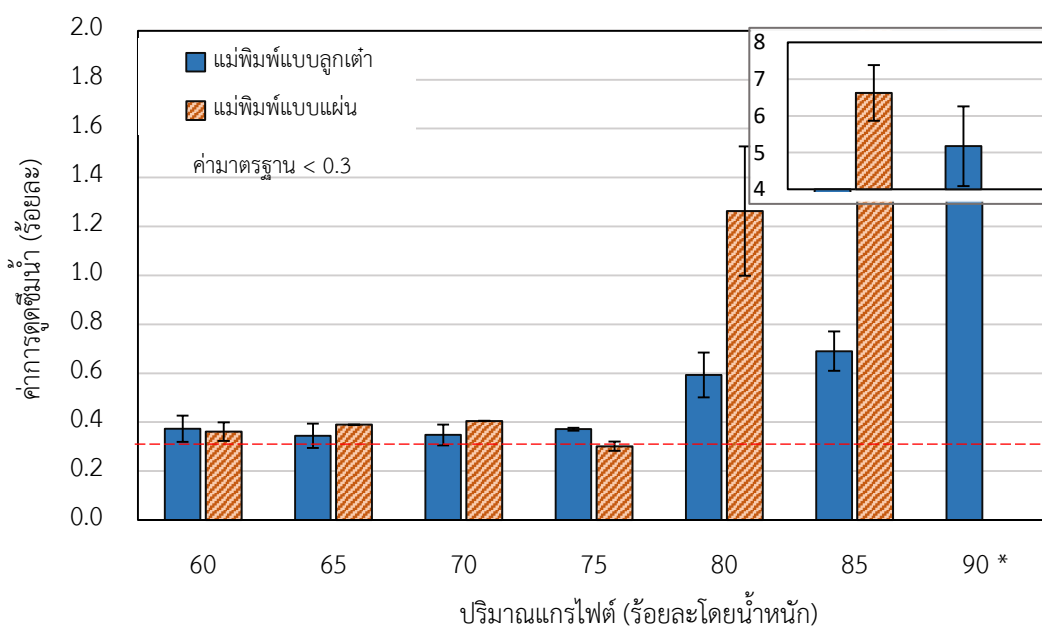
#### 4.1.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำ

จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของคอมพอลสิตตามมาตรฐาน ASTM D570-98 แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าคอมพอลสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์อยู่ในช่วงร้อยละ 60 – 75 โดยน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำในช่วงร้อยละ 0.3 – 0.4 และคอมพอลสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์มากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแกรไฟต์ การที่ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเนื้อคอมพอลสิตมีรูพรุนมากขึ้นจึงทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันพบว่าคอมพอลสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์มากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก คอมพอลสิตที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋ามีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบแผ่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์แบบลูกเต๋้อัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ทำให้อนุภาคของแกรไฟต์อยู่ชิดกันมากกว่าจึงทำให้มีรูพรุนที่น้อยกว่าและทำ

ให้ดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าคอมพอสิตที่ใช้แม่พิมพ์แบบแผ่น แต่อย่างไรก็ตามค่าการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตที่เตรียมได้จากแม่พิมพ์ทั้งสองแบบก็ยังได้ค่าที่สูงเกินค่ามาตรฐาน (ร้อยละ 0.3) [27]

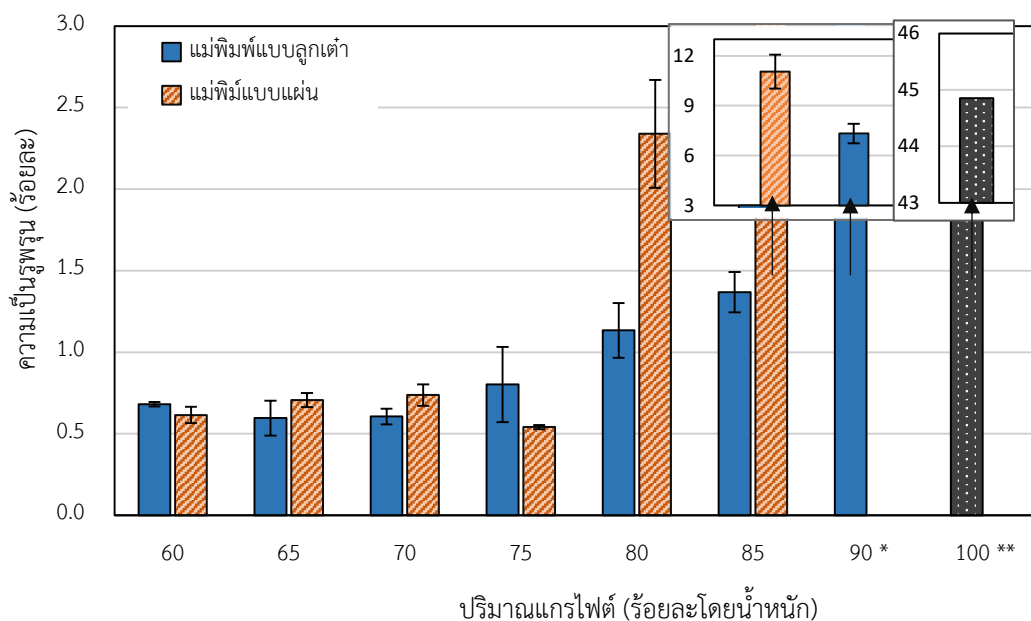
#### 4.1.1.4 ค่าความเป็นรูพรุน

จากผลการทดสอบค่าความเป็นรูพรุนของคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM C20 แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งให้เห็นว่าการใช้เรซินอีพ็อกซีเป็นตัวประสานอนุภาคแกรไฟต์เข้าด้วยกันนั้นสามารถลดความเป็นรูพรุนของแกรไฟต์ลงได้อย่างมากจากความเป็นรูพรุนร้อยละ 44.85 ลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 11.05 ซึ่งคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์อยู่ในช่วงร้อยละ 60 – 75 โดยน้ำหนัก มีค่าความเป็นรูพรุนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 – 1 และคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์มากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก มีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแกรไฟต์ เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันพบว่าคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์ในช่วงร้อยละ 60 – 75 โดยน้ำหนัก มีรูพรุนไม่แตกต่างกัน แต่ในคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์มากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋ามีความเป็นรูพรุนน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบแผ่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าคิดขึ้นรูปชิ้นงานที่ทำให้อนุภาคของแกรไฟต์อยู่ชิดกันมากกว่าจึงทำให้มีรูพรุนที่น้อยกว่าซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายผิวแตกหักของชิ้นงานดังรูปที่ 4.4



**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตโดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

\* แม่พิมพ์แบบแผ่นไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนักได้



**รูปที่ 4.7** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นรูปทรงและปริมาณแอมแปร์ในคอมพอสิตโดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

\* แม่พิมพ์แบบแผ่นไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีแอมแปร์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนักได้

\*\* การอัดขึ้นรูปผงแอมแปร์ใช้ความดันในการอัดที่ 60 เมกะพาสคัลที่อุณหภูมิห้อง

โดยค่าความเป็นรูปทรงของคอมพอสิตไม่ได้มีมาตรฐานระบุไว้ อย่างไรก็ตามถ้าหากคอมพอสิตมีรูปทรงมากก็จะทำให้แก๊สสามารถซึมผ่านได้มากซึ่งเป็นผลเสียต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

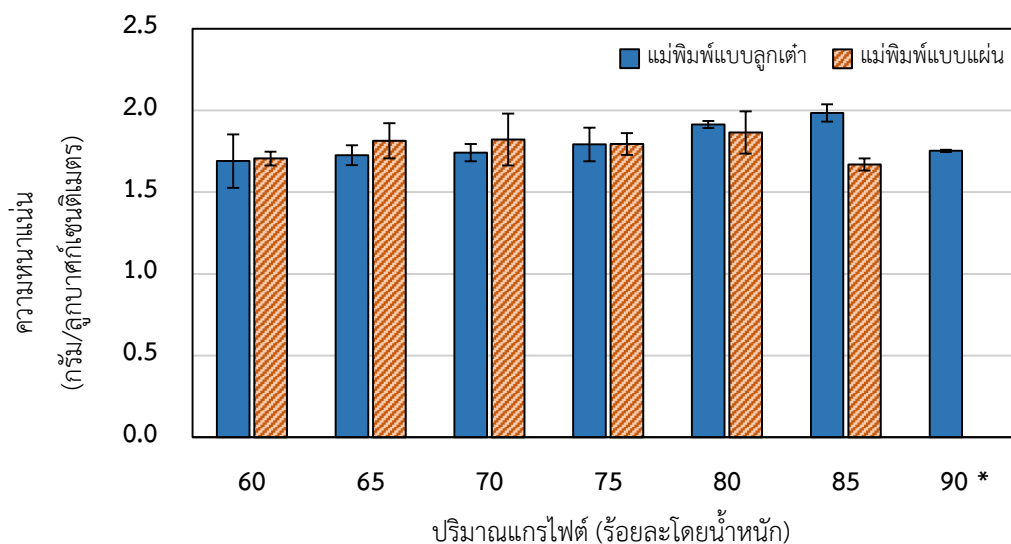
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.1.1.5 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของคอมพอสิตที่ขึ้นรูปได้จะอยู่ในช่วง 1.69 – 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (รูปที่ 4.8) โดยความหนาแน่นมีค่าเพิ่มตามปริมาณแอมแปร์ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋ามีค่าความหนาแน่นมากที่สุดคือ 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อัตราส่วนแอมแปร์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และพบว่าถ้าปริมาณแอมแปร์ในคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้นเกินร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก จะทำให้ความหนาแน่นลดลงจากการที่มีรูปทรงในคอมพอสิตมากขึ้น และเช่นเดียวกับคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบแผ่น โดยคอมพอสิตที่มีแอมแปร์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นที่ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นจะลดลงเมื่อปริมาณแอมแปร์มากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก สาเหตุเกิดจากการที่คอมพอสิตมีรูปทรงมากขึ้น โดยคอมพ



ลิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก มีความเป็นรูพรุนมากกว่าคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก



**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตโดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

\* แม่พิมพ์แบบแผ่นไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนักได้

จากการศึกษาผลของปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตและชนิดของแม่พิมพ์ต่อสมบัติของคอมพอสิตพบว่าปริมาณแกรไฟต์ที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 85 ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋า ในด้านสมบัติของคอมพอสิตถึงแม้ค่าการนำไฟฟ้า (การนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่านคือ 67 และ 27 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) และการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ 0.69) จะยังไม่ผ่านค่ามาตรฐานแต่ด้านสมบัติเชิงกลพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง PEM ได้ โดยมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง 32 เมกะพาสคัล และมีความเป็นรูพรุนร้อยละ 1.37 และความหนาแน่น 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นอัตราส่วนของแกรไฟต์ดังกล่าวจึงนำไปเตรียมคอมพอสิตเพื่อศึกษาในด้านภาวะในการขึ้นรูปและผลของ DBSA-PANI ที่มีต่อสมบัติคอมพอสิต

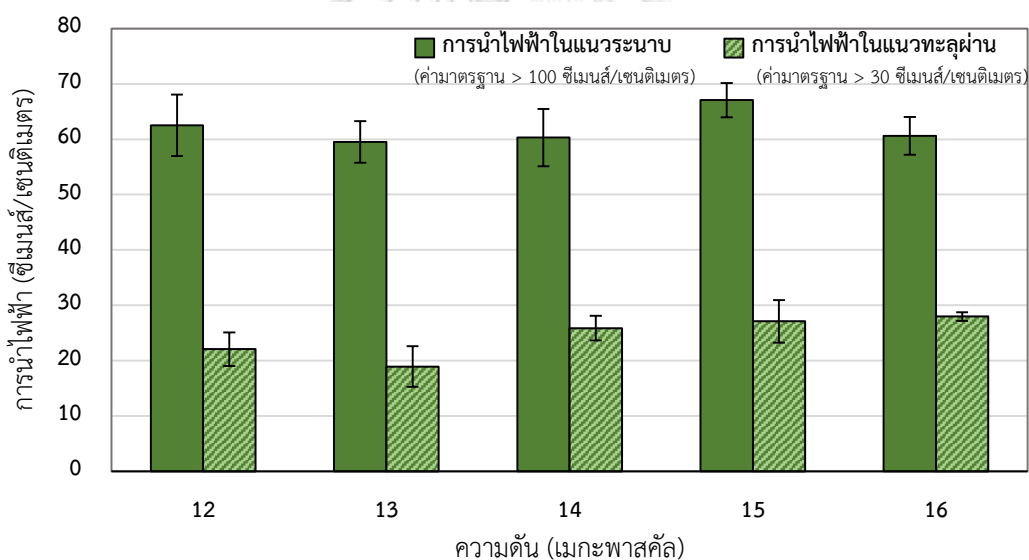
#### 4.1.2 ภาวะในการอัดขึ้นรูป

คอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีที่มีปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ถูกเลือกนำมาศึกษาผลของตัวแปรในการอัดขึ้นรูปเนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงและมีสมบัติเชิงกลที่ผ่านค่ามาตรฐาน (ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมากกว่า 25 เมกะพาสคัล) โดยในการศึกษาจะแปรผันอุณหภูมิในช่วง 100 - 190 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอัด 5 - 60 นาที และความดันตั้งแต่ 12 - 16 เมกะพาสคัล โดยใช้แม่พิมพ์แบบลูกเต๋าในการอัดขึ้นรูป ซึ่งได้ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

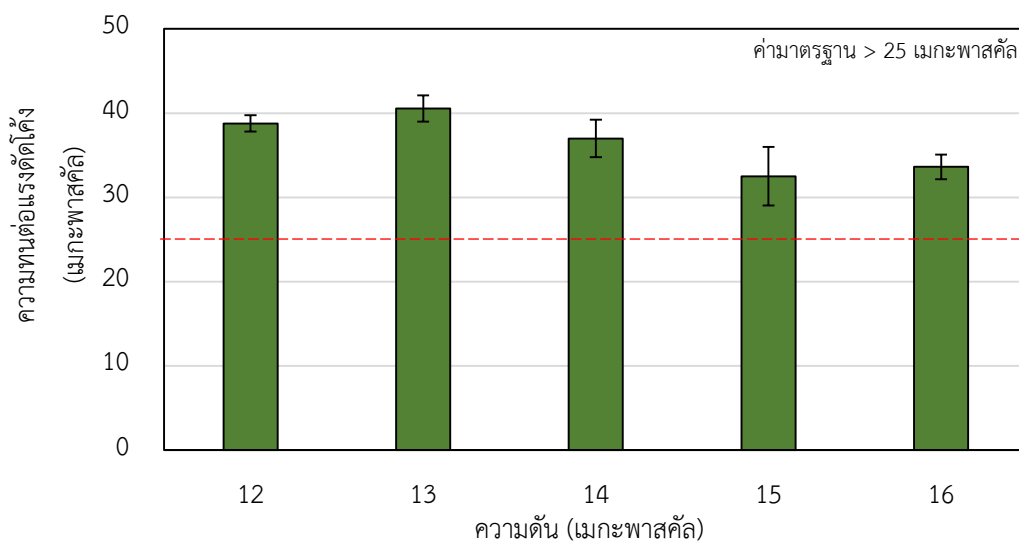
#### 4.1.2.1 ความดันในการอัดขึ้นรูป

ผลการทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าทั้งการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่านพบว่าความดันในการขึ้นรูปในช่วง 12 – 16 เมกะพาสคัล ไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ในส่วนของการทดสอบการโค้งงอแบบสามจุดของคอมพอสิต ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งแสดงในรูปที่ 4.10 โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้แรงดันอัดขึ้นรูปขึ้นงานในช่วง 12 – 14 เมกะพาสคัล คอมพอสิตมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งในช่วง 37.00 – 40.57 เมกะพาสคัล แต่เมื่อเพิ่มแรงดันในการกดอัดเป็น 15 และ 16 เมกะพาสคัล ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งลดลงเป็น 32.51 และ 33.64 เมกะพาสคัล ตามลำดับ การที่ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งลดลงนี้อาจเนื่องมาจากการใช้แรงดันที่สูงในการอัดขึ้นรูปขึ้นงานอาจทำให้เนื้อคอมพอสิตในส่วนของเราซินอีฟ็อกซีที่แข็งตัว (เกิดการเชื่อมขวางสมบูรณ์) ในระหว่างการอัดแบบเย็น (ลดอุณหภูมิของขึ้นงาน) เกิดการแตกภายในขึ้นงานจึงทำให้มีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งลดลง



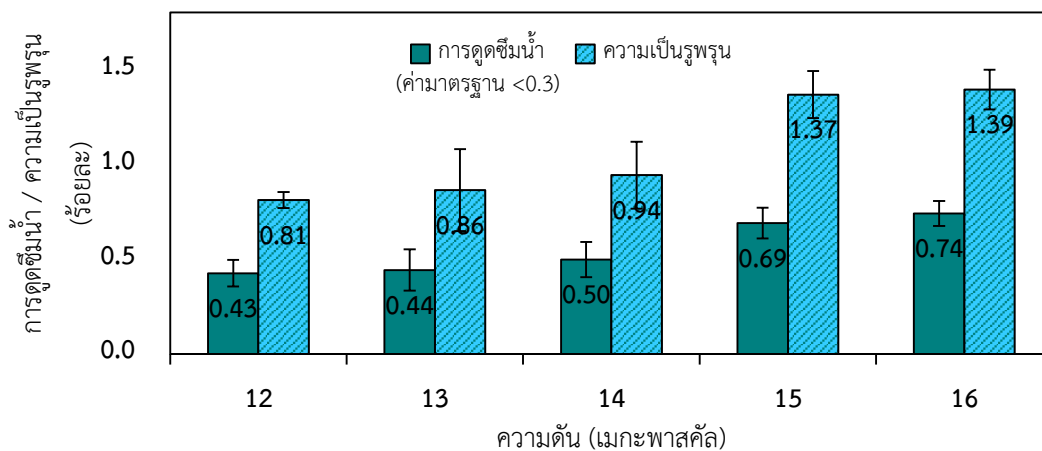
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความเป็นรูพรุนแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิต ค่าการดูดซึมน้ำและรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เห็นได้จากการใช้ความดันที่ 15 และ 16 เมกะพาสคัล คอมพอสิตจะมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.69 และ 0.74 ตามลำดับ ความเป็นรูพรุนร้อยละ 1.37 และ 1.39 ตามลำดับ ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำและความเป็นรูพรุนมีค่ามากกว่าการใช้ความดันที่ 12 13 และ 14 เมกะพาสคัล โดยคอมพอสิตมีค่าการดูดซึมน้ำที่ร้อยละ 0.43 0.44 และ 0.5 ตามลำดับ และความเป็นรูพรุนร้อยละ 0.81 0.86 และ 0.94 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการลดลงของค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง สาเหตุดังกล่าวอาจเป็นเพราะการใช้แรงดันสูงในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งอาจทำให้เนื้อคอมพอสิตในส่วนของเรซินอีพ็อกซีที่แข็งตัวในระหว่างการอัดขึ้นรูปเกิดการแตกภายในชิ้นงานจึงทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงานและทำให้ค่าการดูดซึมน้ำและรูพรุนมีค่าสูงขึ้น

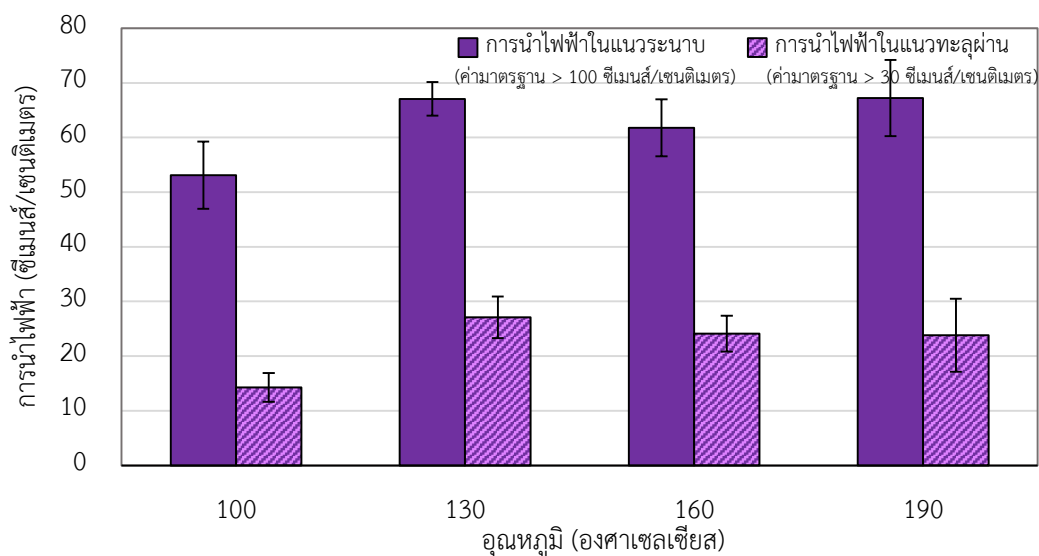




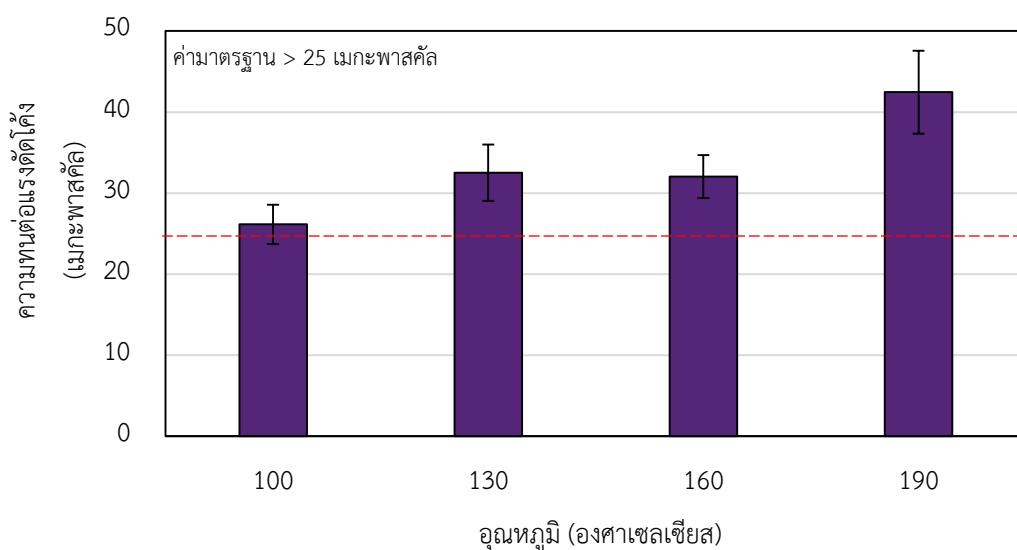
**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ/ความเป็นรูพรุนความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

#### 4.1.2.2 อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป

การศึกษาด้านอุณหภูมิในการขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 100 – 190 องศาเซลเซียส พบว่าคอมพอสิตที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 130 -190 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อเรซินอีพ็อกซีได้รับความร้อนจะทำให้ความหนืดลดลง [28] และสามารถไหลกระจายตัวตามช่องว่างระหว่างอนุภาคแกรไฟต์ได้ดีก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง จึงไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเรซินอีพ็อกซีที่ขัดขวางอนุภาคแกรไฟต์ในการอยู่ชิดกันและเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่ายในการนำไฟฟ้า

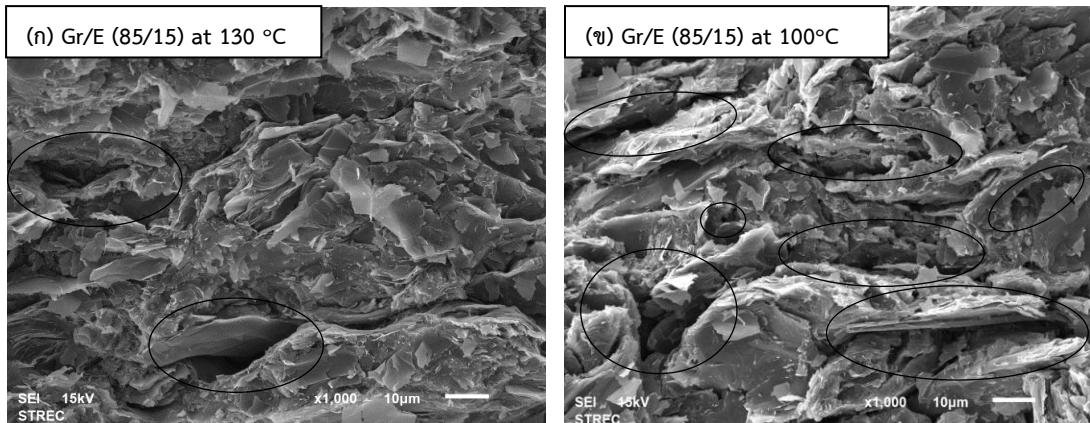


**รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 15 นาที



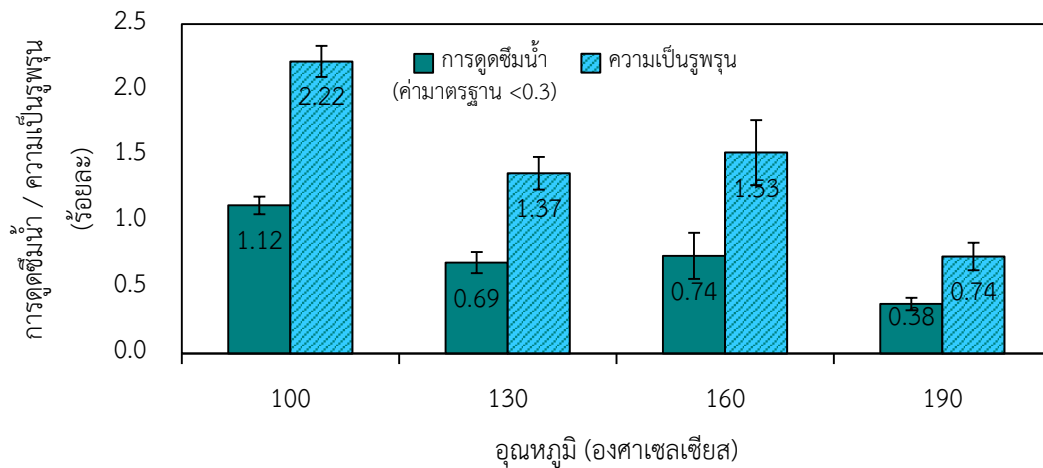
**รูปที่ 4.13** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 15 นาที

ในส่วนผลของการทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.13 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เรซินอีพ็อกซีมีความหนืดลดลงจึงสามารถไหลกระจายตัวในคอมพอสิตได้ดีขึ้นก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง สามารถเห็นได้จากรูปที่ 4.14 ในคอมพอสิตที่อัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีรูพรุนมากกว่าคอมพอสิตที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และจากงานวิจัยของ C. Zhao และคณะ [29] การเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นในการขึ้นรูปเรซินอีพ็อกซีพบว่ามีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของเรซินอีพ็อกซี โดยปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการใช้อุณหภูมิสูงกว่าในการขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิต แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี (ที่เวลาในการขึ้นรูปเท่ากัน) จึงส่งผลให้คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิสูงกว่าเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของเรซินอีพ็อกซีได้สมบูรณ์กว่าจึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิตโดยมีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ (ก) 130 องศาเซลเซียส (ข) 100 องศาเซลเซียส

จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติความเหนียวของเรซินอีพ็อกซีดังกล่าวจึงทำให้คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิในช่วง 100 – 190 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงจากร้อยละ 1.12 เป็น 0.38 เช่นเดียวกับความเป็นรูพรุนจากร้อยละ 2.22 เหลือ 0.74 ดังแสดงในรูปที่ 4.15



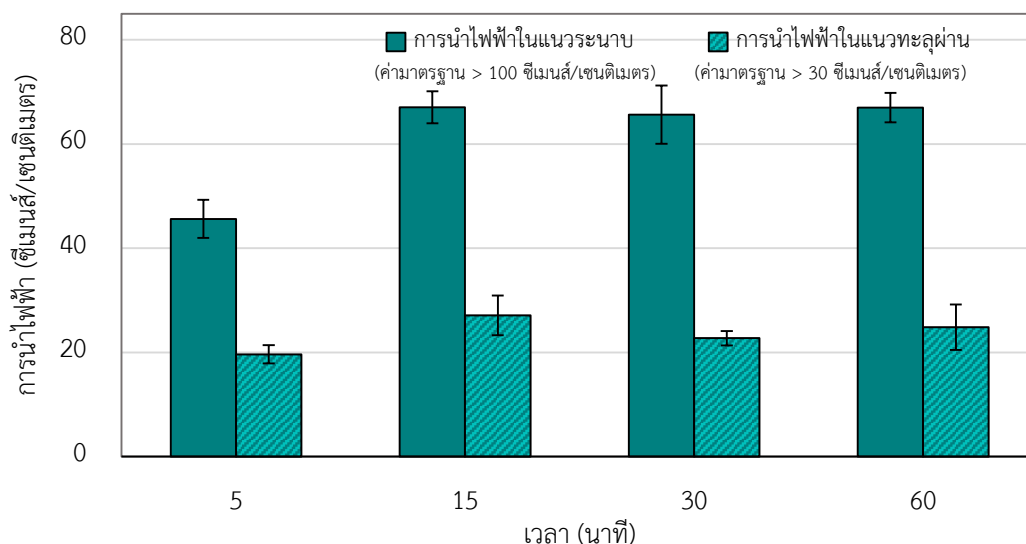
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ/ความเป็นรูพรุนและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 15 นาที

#### 4.1.2.3 เวลาในการอัดขึ้นรูป

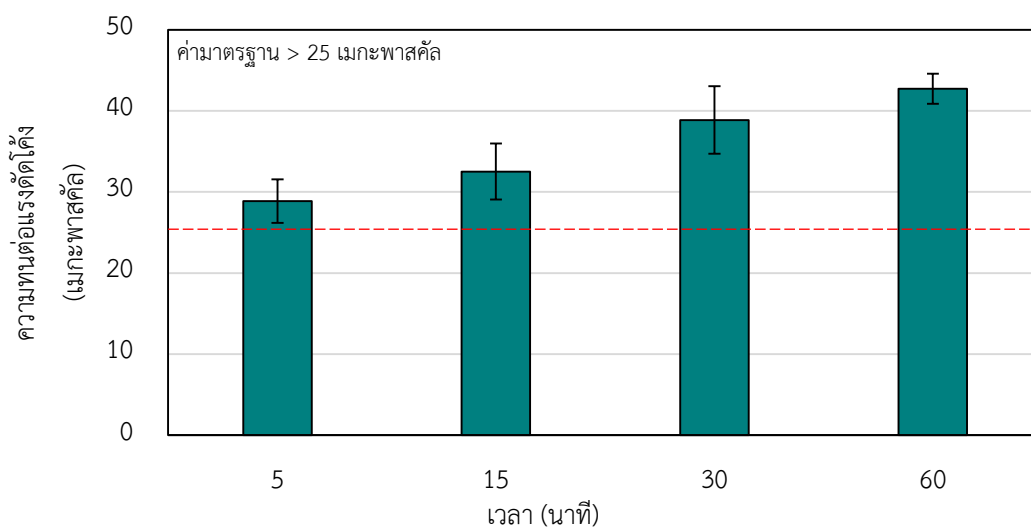
การศึกษาเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีการแปรผันตั้งแต่ 5 – 60 นาที ผลจากการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปคอมพอสิต จากรูปที่ 4.16 พบว่าการใช้เวลาในการขึ้นรูป 5 นาทีไม่เพียงพอที่จะทำให้เรซินอีพ็อกซีกระจายตัวได้ดีเพียงพอในคอมพอสิตเช่นเดียวกับการใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 100 องศาเซลเซียส

ในส่วนของความทนต่อแรงดัดโค้งพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอัดขึ้นรูปทำให้คอมพอสิตมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.17) ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่เพิ่มเวลาทำให้เรซินอีพ็อกซีสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางได้อย่างสมบูรณ์กว่า [29] จึงทำให้เกิดการเชื่อมขวางในโครงสร้างเรซินอีพ็อกซีมากกว่าดังนั้นค่าความทนต่อแรงดัดโค้งจึงเพิ่มขึ้น

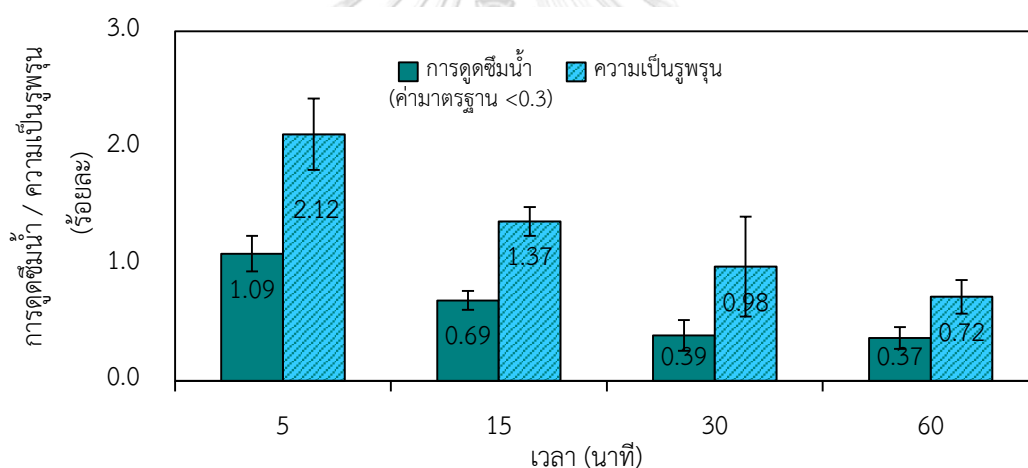
ผลของเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปที่มีต่อการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตพบว่า คอมพอสิตมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงจากร้อยละ 1.09 เป็น 0.37 เมื่อเพิ่มเวลาในการอัดขึ้นรูปจาก 5 – 60 นาที เช่นเดียวกับความเป็นรูพรุนที่ลดลงจากร้อยละ 2.12 เหลือ 0.72 (รูปที่ 4.18) สาเหตุดังกล่าวเนื่องมาจากการที่เรซินอีพ็อกซีเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางในโครงสร้างเรซินอีพ็อกซีมากกว่าทำให้สามารถเติมเต็มในส่วนของรูพรุนได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ/ความเป็นรูพรุนและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส

#### 4.1.2.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปด้วยภาวะที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.1 มีค่าอยู่ในช่วง 1.88 – 2.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตจะมีผลต่อความหนาแน่นมากกว่าภาวะในการขึ้นรูป

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของคอมพอลิโอมิตีที่ขึ้นรูปด้วยภาวะในการทดลองที่แตกต่างกัน

ชิ้นงาน			ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	
ความดัน (เมกะพาสคัล)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
13	130	15	1.95	±0.008
12	130	15	1.92	±0.126
14	130	15	1.89	±0.003
15	130	15	1.98	±0.053
16	130	15	1.88	±0.025
15	100	15	1.97	±0.011
15	130	15	1.98	±0.053
15	160	15	2.08	±0.157
15	190	15	2.04	±0.074
15	130	5	1.94	±0.009
15	130	15	1.98	±0.053
15	130	30	2.06	±0.054
15	130	60	1.97	±0.111

จากการทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอลิโอมิตีของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีพบว่า ความดันไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปควรมากกว่า 130 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปต้องใช้เวลาที่ 15 นาทีเป็นอย่างน้อย

จากการศึกษาผลของตัวแปรด้านการอัดขึ้นรูปต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งพบว่าคอมพอลิโอมิตีที่เตรียมในภาวะต่างๆ มีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมากกว่า 25 เมกะพาสคัล ซึ่งผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานตาม DOE สหรัฐอเมริกา [5] ในส่วนของความดันในการขึ้นรูปพบว่าการใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปคอมพอลิโอมิตีมากเกินไปทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งลดลง โดยการใช้แรงดันที่ 13 เมกะพาสคัล จะทำให้คอมพอลิโอมิตีมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมากที่สุดที่ 40.57 เมกะพาสคัล ส่วนอุณหภูมิในการขึ้นรูปคอมพอลิโอมิตีพบว่าการใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งดีที่สุดคือ 42.46 เมกะพาสคัล และเวลาในการขึ้นรูปที่ 60 นาทีจะให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมากที่สุดที่ 42.72 เมกะพาสคัล

จากการศึกษาผลของตัวแปรด้านการอัดขึ้นรูปต่อค่าการดูดซึมน้ำและความเป็นรูพรุนพบว่า คอมพอสิตที่ศึกษามีค่าการดูดซึมน้ำเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (ต่อน้อยกว่าร้อยละ 0.3 [27]) และพบว่าการใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปมากกว่า 14 เมกะพาสคัล ทำให้รูพรุนในคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.4 ส่วนเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูปยิ่งใช้เวลาและอุณหภูมิมากจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำและรูพรุนลดลง

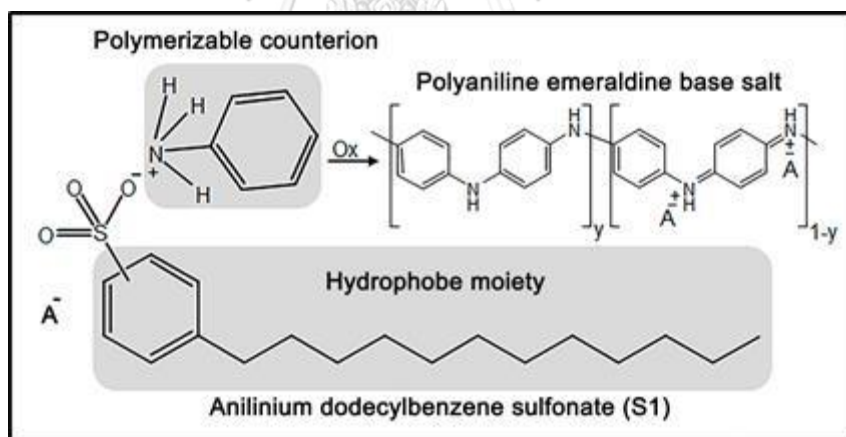
จากการศึกษาผลของตัวแปรด้านการอัดขึ้นรูปต่อความหนาแน่นพบว่าค่าความหนาแน่นจะอยู่ในช่วง 1.88 – 2.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญ



## 4.2 ศึกษาผลของสารตัวเติมพอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่มีต่อสมบัติของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิต

### 4.2.1 พอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค (DBSA-PANI)

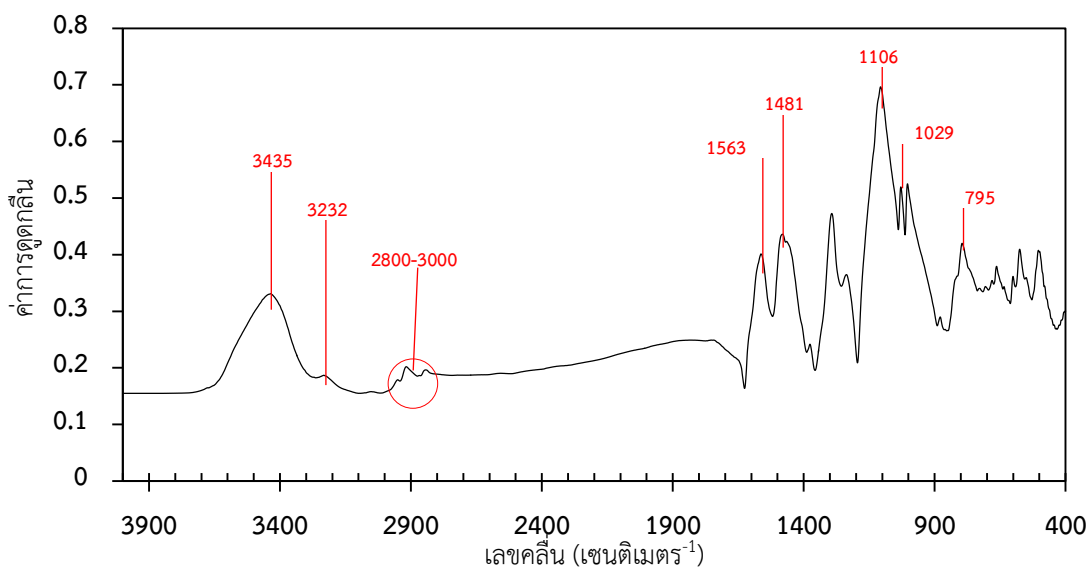
จากการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคพบว่า ในขั้นตอนแรก การผสมอะนิลีนและ DBSA ในน้ำ สารทั้งสองรวมตัวกันเกิดสารประกอบเชิงซ้อน anilinium-DBSA (สีขาว) และหลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงที่ 0 องศาเซลเซียส แล้วเติมสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ไดซัลเฟต เพื่อเกิดปฏิกิริยา oxidative polymerization หลังจากนั้นสารผสมจะเปลี่ยนสีเป็นสีเขียวน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงบางส่วนของสายโซ่ของพอลิอะนิลีนเกิดสถานะออกซิเดชัน pernigraniline จากนั้นจะเปลี่ยนสถานะออกซิเดชันเป็น emeraldine ที่มีสีเขียวดำ ซึ่งจะบ่งบอกถึงเวลาสิ้นสุดของการเกิดปฏิกิริยา oxidative polymerization ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น polyaniline emeraldine base salt มีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 4.19 นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ร่วมเช่น กรดซัลฟิวริก แอมโมเนียมซัลเฟต และ DBSA ที่เหลือจากปฏิกิริยาดังกล่าว ซึ่งสารเหล่านี้ถูกล้างออกด้วยเมทานอลและน้ำตามลำดับ [22]



รูปที่ 4.19 แสดงการสังเคราะห์ DBSA-PANI [30]

พอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่เตรียมได้จะมีสีเขียวดำ และเมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบมีค่าการนำไฟฟ้าคือ  $0.131 \pm 0.015$  ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของพอลิอะนิลีนที่โดปด้วยกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคโดยใช้เทคนิค FTIR ผลแสดงในรูปที่ 4.20





รูปที่ 4.20 FTIR spectra ของผง DBSA-PANI ที่สังเคราะห์ได้

ผลการทดสอบเอกลักษณ์โดยเทคนิค FTIR พบว่าปรากฏพีกที่เลขคลื่น 3435 ซึ่งเกิดเนื่องจากการสั่นแบบยืดของ N-H และพีกที่เลขคลื่น 3232 เป็นการสั่นของแบบยืดของพันธะไฮโดรเจน N-H ระหว่างสายโซ่ระหว่างหมู่เอมีน (amine) และ ไอมีน (imine) ตามงานวิจัยของ Zheng และคณะ [31] ในส่วนของพีกที่เลขคลื่น 1563 และ 1481 เป็นพีกที่เกิดเนื่องจากการสั่นแบบยืดของ C-N ที่ถูกโคบด้วยกรดโตเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคของหมู่เบนโซอิด (benzoid) และหมู่ควิโนอิด (quinoid) พีกที่เลขคลื่น 795 แสดงถึงการสั่นแบบงอออกนอกระนาบของ C-H ในสารพวอะโรมาติกแบบแทนที่ชนิด P ในส่วนของกรดโตเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค หมู่ซัลโฟนิคปรากฏพีกการสั่นแบบยืดที่เลขคลื่น 1106 และ 1029 และส่วนของไฮโดรคาร์บอนในกรดโตเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคปรากฏพีกการสั่นแบบยืดที่เลขคลื่น 2800 – 3000 ซึ่งจากข้อมูลเส้นสเปกตรัมดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ D. Castillo-Castro และคณะ [32] ซึ่งจากผลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็น DBSA-PANI

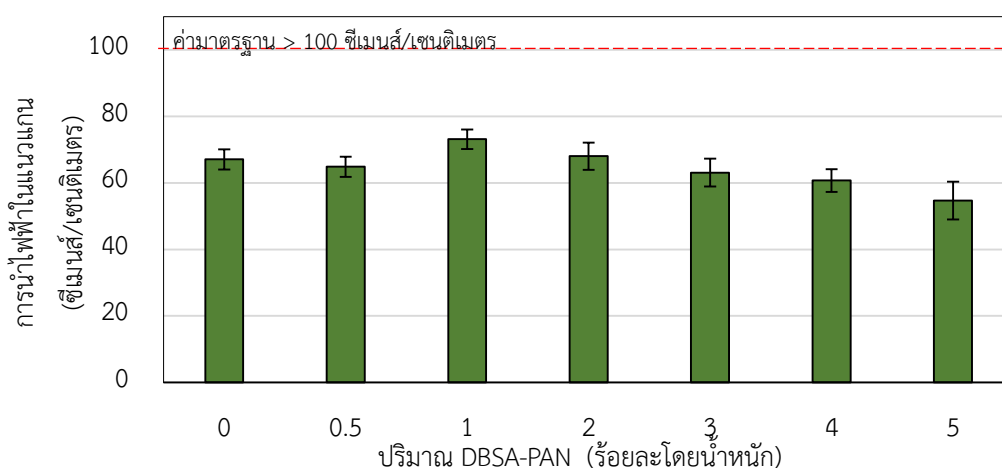
#### 4.2.2 สมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (DBSA-PANI/ แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี)

สารตัวเติม DBSA-PANI ที่สังเคราะห์ได้จะนำผสมลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีที่สัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0.5 – 5 โดยน้ำหนัก โดยมีแกรไฟต์ในสัดส่วนร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 10 – 14.5 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบลูกเต๋าที่แรงดันในการกดอัด 15 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (การใช้ภาวะดังกล่าวใน

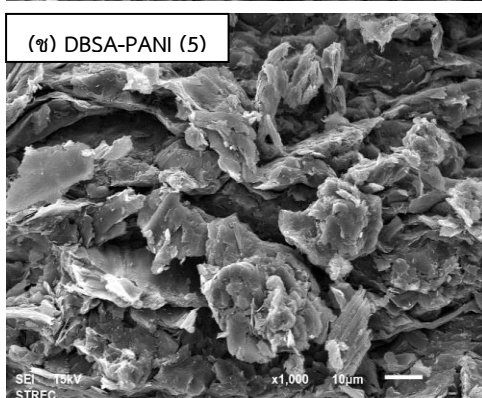
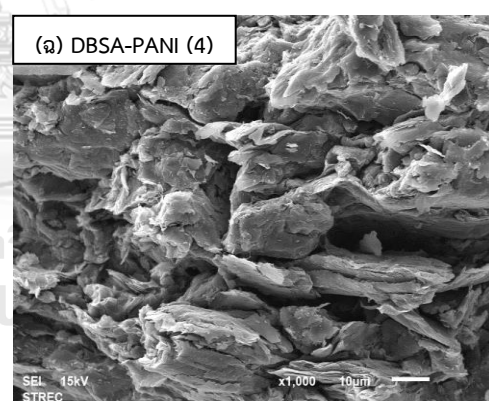
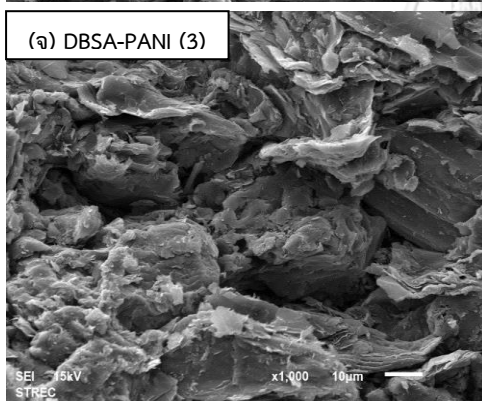
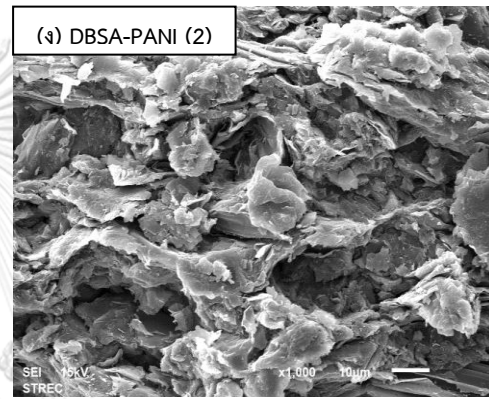
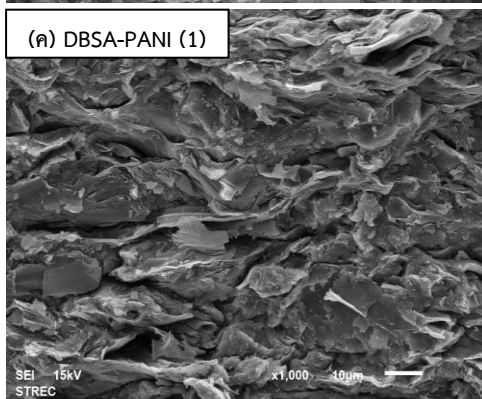
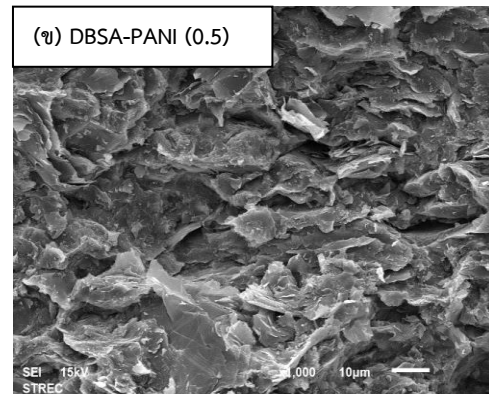
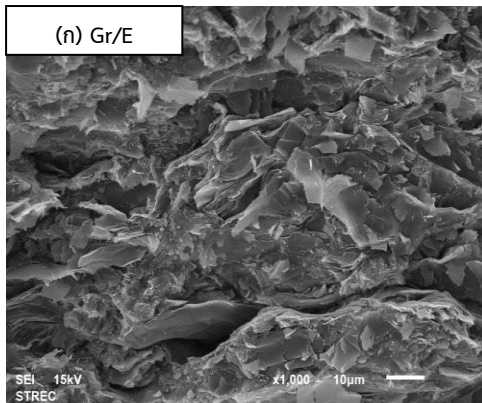
การขึ้นรูปเนื่องมาจากถ้าใช้ภาวะรุนแรงในการขึ้นรูปอาจจะทำให้มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ DBSA-PANI [33]) และนำมาศึกษาสมบัติต่างๆ และได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

#### 4.2.2.1 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่าน

ผลจากการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของคอมพอสิต (รูปที่ 4.21) พบว่าค่าการนำไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม DBSA-PANI ลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีในปริมาณร้อยละ 0.5 2 และ 3 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติม DBSA-PANI ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากเดิม 67 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (คอมพอสิตที่ไม่มี DBSA-PANI) เป็น 73 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร แต่ถ้าเติม DBSA-PANI ลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอยู่ที่ 54 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร โดยการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าเนื่องจาก DBSA-PANI มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและเมื่อผสมกับเรซินอีพ็อกซีแล้วจึงทำให้เรซินอีพ็อกซีมีค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเรซินอีพ็อกซีดังกล่าวเชื่อมอนุภาคแกรไฟต์เข้าด้วยกันจึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเติม DBSA-PANI ในปริมาณที่มากขึ้นอาจทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของ DBSA-PANI ดังรูปที่ 4.22 ที่จะเห็นว่าในคอมพอสิตที่มีปริมาณ DBSA-PANI มาก เนื้อคอมพอสิตมีการรวมตัวของ DBSA-PANI และเรซินอีพ็อกซีเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งกลุ่มก้อนของ DBSA-PANI และเรซินอีพ็อกซีทำให้เกิดการขัดขวางเส้นทางการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์ ถึงแม้การเติม DBSA-PANI เข้าไปที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามยังคงไม่ถึงค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนมาตรฐานที่ 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร [5]



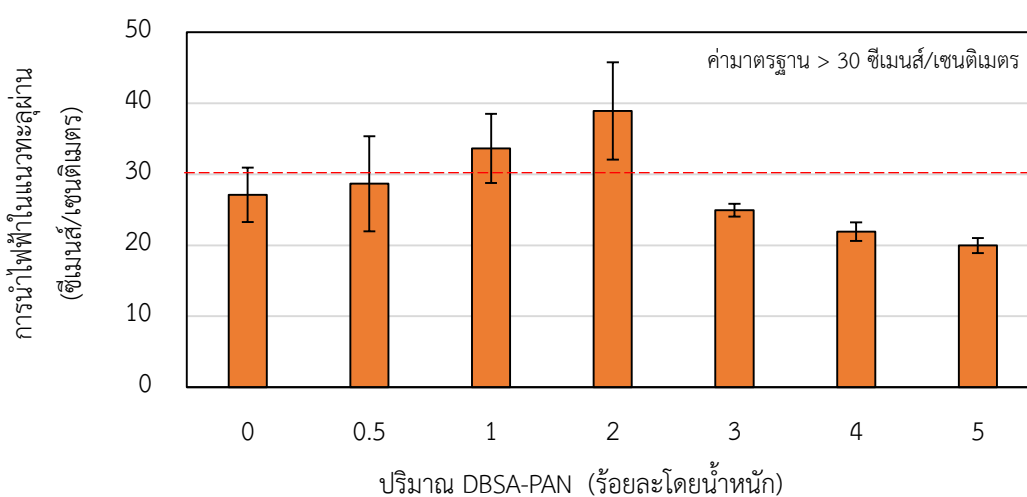
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นผิวแตกหักทางสัณฐานวิทยาของ DBSA-PAN/แกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีคอมพอสิต

- (ก) Gr/E (85/15)      (ข) DBSA-PANI 0.5 wt.%  
 (ค) DBSA-PANI 1 wt.%    (ง) DBSA-PANI 2 wt.%  
 (จ) DBSA-PANI 3 wt.%    (ฉ) DBSA-PANI 4 wt.%  
 (ช) DBSA-PANI 5 wt.%

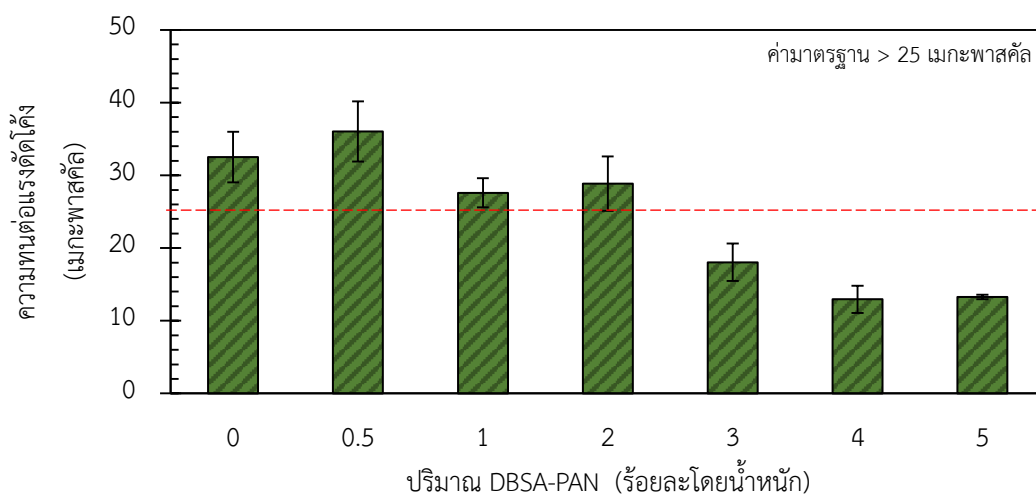
ในส่วนของการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน (รูปที่ 4.23) พบว่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิตสูงขึ้นจากร้อยละ 0.5 - 2 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่เพิ่มส่วนที่นำไฟฟ้าได้เข้าไปในคอมพอสิตมากขึ้นจึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเติม DBSA-PANI ลงในคอมพอสิตร้อยละ 3 - 5 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของ DBSA-PANI และเรซินอีพ็อกซี



**รูปที่ 4.23** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

#### 4.2.2.2 สมบัติเชิงกล

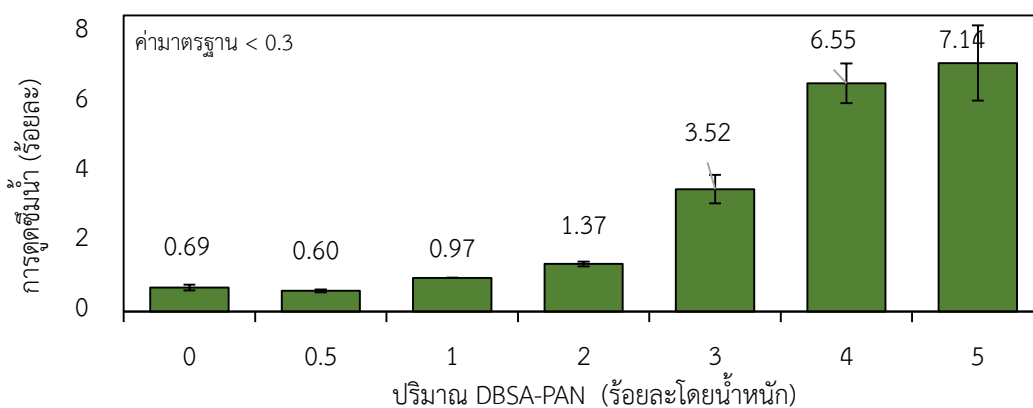
จากผลการทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งของคอมพอสิตในรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต ทำให้ความทนต่อแรงดัดโค้งลดลงเล็กน้อยในช่วงของการเติม DBSA-PANI ร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งที่ 27.6 และ 28.9 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และลดลงอย่างมากในช่วงของการเติม DBSA-PANI ร้อยละ 3 4 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งที่ 18.04 12.95 และ 13.27 เมกะพาสคัล ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ความทนต่อแรงดัดโค้งลดลงเพราะการที่ปริมาณของเรซินอีพ็อกซีลดลงจึงทำให้การยึดติดของแกรไฟต์ลดลงและอาจเกิดการรวมกลุ่มของ DBSA-PANI และเรซินอีพ็อกซี จึงทำให้เกิดรูพรุนในคอมพอสิตมากขึ้นแล้วส่งผลทำให้ความทนต่อแรงดัดโค้งลดลง ถึงแม้การเติม DBSA-PANI ลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งลดลงแต่ในคอมพอสิตที่เติม DBSA-PANI ร้อยละ 0.5 1 และ 2 โดยน้ำหนัก ก็ยังมีค่ามากกว่า 25 เมกะพาสคัล [5] ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน



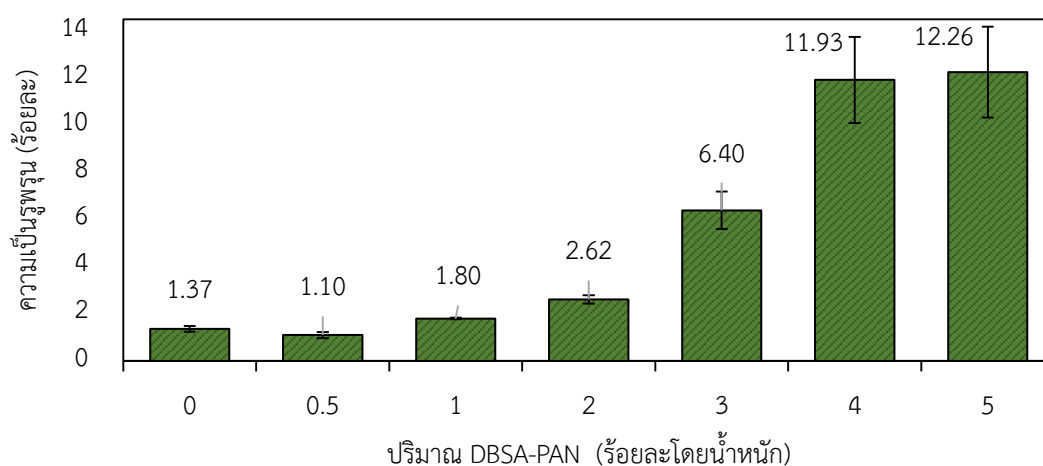
**รูปที่ 4.24** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนต่อแรงตัดโค้งและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

#### 4.2.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความเป็นรูพรุน

ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความเป็นรูพรุนของคอมพอสิตของ DBSA-PANI/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี แสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 โดยผลจากทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตที่เติม DBSA-PANI ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีรูพรุนในคอมพอสิตลดลงจากเดิมเล็กน้อยจากค่าความเป็นรูพรุนร้อยละ 1.37 เป็น 1.10 จึงทำให้การดูดซึมน้ำลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจาก DBSA-PANI เข้าไปช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคแกรไฟต์จึงทำให้รูพรุนในคอมพอสิตลดลงซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.22ข แต่ในคอมพอสิตที่มี DBSA-PANI ตั้งแต่ร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนัก พบว่ามีรูพรุนในคอมพอสิตมากขึ้นรูพรุนเหล่านี้เกิดจากการที่เรซินอีพ็อกซีในคอมพอสิตลดลงจึงทำให้การยึดติดของแกรไฟต์ลดลงและเกิดรูพรุนขึ้น และอีกหนึ่งสาเหตุเนื่องมาจาก DBSA-PANI และเรซินอีพ็อกซีเกิดการรวมกลุ่มกันจึงทำให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยคอมพอสิตที่มี DBSA-PANI ร้อยละ 5 โดยมีมวลจะมีความเป็นรูพรุนสูงถึงร้อยละ 12.26 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 7.14



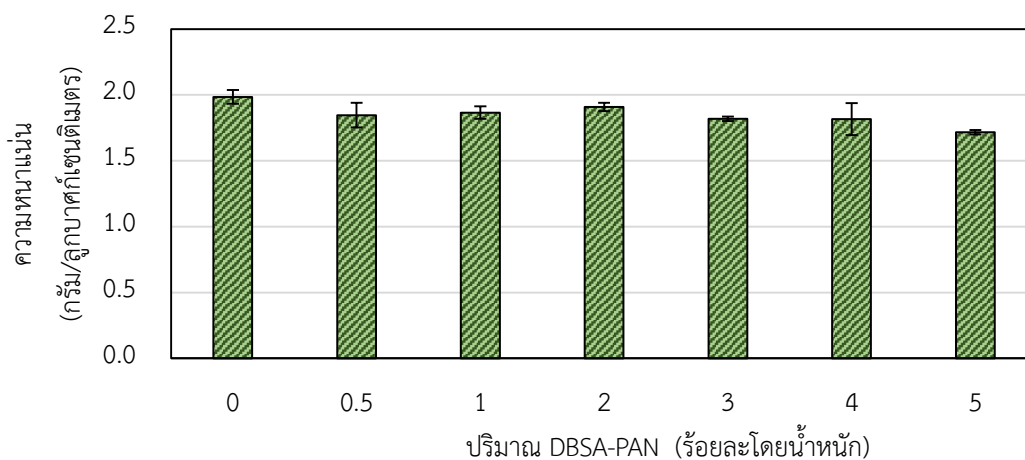
**รูปที่ 4.25** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



**รูปที่ 4.26** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นรูพรุนและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

#### 4.2.2.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของคอมพอสิตที่เติม DBSA-PANI แสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าคอมพอสิตจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.72 - 1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยความหนาแน่นของชิ้นงานแปรผันกับความความเป็นรูพรุน โดยคอมพอสิตที่มี DBSA-PANI ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่นน้อยที่สุดที่ 1.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนคอมพอสิตอื่นๆ ก็มีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างจากคอมพอสิตที่ไม่เติม DBSA-PANI มากอย่างมีนัยสำคัญ



**รูปที่ 4.27** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาณ DBSA-PANI ในคอมพอสิต โดยคอมพอสิตอัดขึ้นรูปที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิตของ DBSA-PANI/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี พบว่าปริมาณ DBSA-PANI ร้อยละ 1 จะช่วยเพิ่มสมบัติด้านการนำไฟฟ้าในแนวระนาบให้คอมพอสิต โดยมีค่าเท่ากับ-73 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านเป็น 33 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (ผ่านค่ามาตรฐานที่มากกว่า 30 ซีเมนส์/เซนติเมตร) ความทนต่อแรงดัดโค้งมีค่ามากกว่ามาตรฐาน (25 เมกะพาสคัล) และสมบัติอื่นยังไม่ผ่านมาตรฐาน ดังนั้นการนำคอมพอสิตดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าหรือแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองชั้นในเซลล์เชื้อเพลิง PEM จะสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นนำไฟฟ้าขนาดบางได้ (เนื่องจากคอมพอสิตมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งที่ผ่านมาตรฐาน) จึงสามารถลดน้ำหนักของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ลดลงได้ และเป็นการลดวัสดุที่ใช้ให้น้อยลง อย่างไรก็ตาม ต้องมีการปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆ ให้ได้ตามมาตรฐานเพื่อที่จะนำไฟใช้งานได้จริง



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อสมบัติของคาร์บอนคอมพอสิต (แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี) พบว่าเมื่อปริมาณแกรไฟต์ในคอมพอสิตมากขึ้นส่งผลให้ค่าการนำกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นแต่สมบัติเชิงกลและทางกายภาพด้อยลง โดยคอมพอสิตที่มีสมบัติที่ดีที่สุดคือคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าการนำกระแสไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวทะลุผ่านคือ 67 และ 27 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งยังไม่ผ่านค่ามาตรฐานที่ 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (มากกว่า 25 เมกะพาสคัล) อยู่ที่ 32 เมกะพาสคัล ความหนาแน่นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (น้อยกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) คือมีค่า 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.69 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (น้อยกว่าร้อยละ 0.3) และความเป็นรูพรุนเท่ากับร้อยละ 1.37

จากการนำคอมพอสิตที่มีแกรไฟต์ในอัตราส่วนร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ไปศึกษาตัวแปรในการขึ้นรูปพบว่า แม่พิมพ์แบบลูกเต๋า (Dice mold) สามารถขึ้นรูปคอมพอสิตที่ให้สมบัติการนำไฟฟ้าสมบัติเชิงกลและทางกายภาพดีกว่าแม่พิมพ์แบบแผ่น (Plate mold) ส่วนภาวะในการขึ้นรูปพบว่าความดันในการขึ้นรูปในช่วง 12 - 16 เมกะพาสคัล ให้ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สมบัติอื่นๆ ที่ศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความดันในการกดอัดจะทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลง และการดูดซึมน้ำมีค่าที่เพิ่มขึ้น ด้านอุณหภูมิพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 100 - 190 องศาเซลเซียส คอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลและค่าการดูดซึมน้ำที่ดีขึ้น เมื่อใช้เวลาในการอัดขึ้นรูปคอมพอสิตในช่วง 5 - 60 นาที พบว่าการใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปมากทำให้สมบัติของคอมพอสิตดีขึ้นในด้านสมบัติเชิงกลและการดูดซึมน้ำเช่นกัน

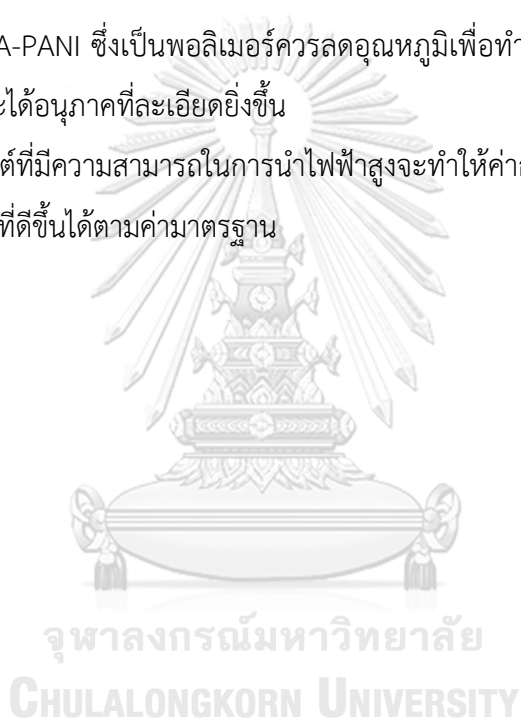
การศึกษาผลของ DBSA-PANI ที่เติมลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีพบว่าปริมาณ DBSA-PANI ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มสมบัติด้านการนำกระแสไฟฟ้าในแนวระนาบของคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีจาก 65 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เป็น 65-73 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร อย่างไรก็ตามก็ยังไม่ผ่านค่ามาตรฐานที่ 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และการนำกระแสไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านจาก 27 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เป็น 33-38 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร แต่สมบัติด้านอื่นๆ จะด้อยลงไม่ว่าจะเป็นค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง การดูดซึมน้ำและเป็นความรูพรุน ยกเว้นความหนาแน่น โดยปริมาณที่เหมาะสมของ DBSA-PANI ที่เติมลงในคอมพอสิตของแกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซีคือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำกระแสไฟฟ้าในแนวระนาบ 73 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (เพิ่มขึ้นจากคอมพอสิตของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีร้อยละ 9) การนำกระแสไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านระนาบ 33 ซี



เมนส์ต่อเซนติเมตร (เพิ่มขึ้นจากคอมพอลสิตของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซีร้อยละ 24) ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง 27 เมกะพาสคัล ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ร้อยละ 0.97 ค่าความเป็นรูปพรรณร้อยละ 1.8 และมีความหนาแน่น 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้เรซินอีพ็อกซีที่มีความหนืดต่ำในการผสมขึ้นรูปคอมพอลสิตของแกรไฟต์เรซินอีพ็อกซี เพราะจะทำให้การผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง และเมื่อนำไปอัดขึ้นรูปจะทำให้คอมพอลสิตอัดตัวกันดีขึ้น
2. การบด DBSA-PANI ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ควรลดอุณหภูมิเพื่อให้ DBSA-PAN แข็งตัวแล้วทำการบดเพื่อจะได้อนุภาคที่ละเอียดยิ่งขึ้น
3. การใช้แกรไฟต์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงจะทำให้ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของคอมพอลสิตมีแนวโน้มที่ดีขึ้นได้ตามค่ามาตรฐาน



### รายการอ้างอิง

1. Nehrir, M.H. and C. Wang, *6 - Fuel cells*, in *Electric Renewable Energy Systems*, M.H. Rashid, Editor. 2016, Academic Press: Boston. p. 92-113.
2. Li, X. and I. Sabir, *Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs*. International Journal of Hydrogen Energy, 2005. **30**(4): p. 359-371.
3. Heinzl, A., et al., *Injection moulded low cost bipolar plates for PEM fuel cells*. Journal of Power Sources, 2004. **131**(1): p. 35-40.
4. Alaswad, A., et al., *Fuel Cell Technologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide*, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016, Elsevier.
5. Drive, U.S. *Fuel Cell Technical Team Roadmap*. 2013 [cited 2016 20 February]; Available from: [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/fctt\\_roadmap\\_june2013.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/fctt_roadmap_june2013.pdf)
6. Planes, E., L. Flandin, and N. Alberola, *Polymer Composites Bipolar Plates for PEMFCs*. Energy Procedia, 2012. **20**: p. 311-323.
7. Lee, J.H., et al., *Effect of carbon fillers on properties of polymer composite bipolar plates of fuel cells*. Journal of Power Sources, 2009. **193**(2): p. 523-529.
8. Jia, W., et al., *Electrically conductive composites based on epoxy resin with polyaniline-DBSA fillers*. Synthetic Metals, 2003. **132**(3): p. 269-278.
9. EG&G Technical Services, I., *Fuel Cell Handbook* ed. 7. 2004, West Virginia: U.S. Department of energy.
10. Barbir, F., *PEM Fuel Cells Theory and Practice*, ed. 2. 2013, . California: Academic Press.
11. Zhang, J., et al., *PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis*, ed. 1. Vol. 2013. 2013, Amsterdam: Elsevier.
12. Pierson, H.O., *Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes Processing, Properties and Applications*, ed. 1. 1994, New Jersey: NOYES PUBLICATION.

13. Wikipedia. *Valence and conduction bands*. 2018 [cited 2018 20 June]; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Valence\\_and\\_conduction\\_bands](https://en.wikipedia.org/wiki/Valence_and_conduction_bands)
14. Ellis, B., *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*, ed. 1. 1993, Dordrecht: Springer Science+Business Media.
15. May, C., *Epoxy Resins: Chemistry and Technology*, ed. 2. 1987, New York: Marcel Dekker Inc.
16. Rupprecht, L., *Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications*. 1999, Canada: William Andrew.
17. Osswald, T.A., *Polymer Processing: Modeling and Simulation*, ed. 1. 2006, Munich: Hanser Publishers.
18. Zehev Tadmor, C.G.G., *Principles of Polymer Processing*, ed. 2. 2006, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
19. Dweiri, R. and J. Sahari, *Electrical properties of carbon-based polypropylene composites for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)*. *Journal of Power Sources*, 2007. **171**(2): p. 424-432.
20. Suherman, H., J. Sahari, and A.B. Sulong, *Effect of small-sized conductive filler on the properties of an epoxy composite for a bipolar plate in a PEMFC*. *Ceramics International*, 2013. **39**(6): p. 7159-7166.
21. Radhakrishnan, S., et al., *High-temperature, polymer-graphite hybrid composites for bipolar plates: Effect of processing conditions on electrical properties*. *Journal of Power Sources*, 2007. **163**(2): p. 702-707.
22. Haba, Y., et al., *Polymerization of aniline in the presence of DBSA in an aqueous dispersion*. *Synthetic Metals*, 1999. **106**(1): p. 59-66.
23. Lee, D., et al., *Method for exposing carbon fibers on composite bipolar plates*. *Composite Structures*, 2015. **134**: p. 1-9.
24. International, A., *ASTM D790-03, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2003, West Conshohocken: PA.
25. International, A., *ASTM D570-98, Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. 1998, West Conshohocken: PA.

26. International, A., *ASTM C20-00(2015), Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*. 2015, West Conshohocken: PA.
27. Mehta, V. and J.S. Cooper, *Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing*. *Journal of Power Sources*, 2003. **114**(1): p. 32-53.
28. Younes, M., et al., *The curing of epoxy resins as studied by various methods*. *Polymer*, 1994. **35**(24): p. 5269-5278.
29. Zhao, C., G. Zhang, and L. Zhao, *Effect of Curing Agent and Temperature on the Rheological Behavior of Epoxy Resin Systems*. Vol. 17. 2012. 8587-94.
30. Farias-Mancilla, R., et al. *Synthesis and Characterization of Polyaniline / Magnetite Nanocomposite*. in *International Journal of Theoretical and Applied Nanotechnology* 2016. Avestia.
31. Zheng, W., et al., *Experimental Evidence for Hydrogen Bonding in Polyaniline: Mechanism of Aggregate Formation and Dependency on Oxidation State*. *Macromolecules*, 1997. **30**(10): p. 2953-2955.
32. Del Castillo-Castro, T., et al., *Synthesis and characterization of composites of DBSA-doped polyaniline and polystyrene-based ionomers*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007. **38**(2): p. 639-645.
33. Silva, M.J.d., et al., *Electrical, mechanical, and thermal analysis of natural rubber/polyaniline-Dbas composite*. *Materials Research*, 2014. **17**: p. 59-63.
34. Uhlir, A., *The potentials of infinite systems of sources and numerical solutions of problems in semiconductor engineering*. *The Bell System Technical Journal*, 1955. **34**(1): p. 105-128.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ภาคผนวก ก**  
**ข้อมูลสมบัติสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง**

**1. แกรไฟต์ (Inoxia)**

ชนิดแหล่งผลิต : สังกะราษะห์

ขนาดอนุภาค : 300 เมช (95% <53 ไมโครเมตร)

ความบริสุทธิ์ : คาร์บอนร้อยละ 98.6 กำมะถันร้อยละ 0.05 ไนโตรเจนร้อยละ 0.05%  
เถ้าร้อยละ 0.8% สารระเหยร้อยละ 0.3 และความชื้นร้อยละ 0.3

สี : เทา - ดำ

ความถ่วงจำเพาะ : 1.9 - 2.3

ความสามารถในการละลายในน้ำ : ไม่ละลาย

จุดหลอมเหลว : 2820 องศาเซลเซียส

**2. เรซินอีพ็อกซี (Epoxy No.105)**

เรซินอีพ็อกซี Epoxy No.105 เป็นเรซินชนิดความหนืดปานกลาง (Medium viscosity) ผลิตจาก bisphenol a และ epichlorohydrin

ปริมาณหมู่อีพ็อกซี : 5260 - 5420 มิลลิโมล/กิโลกรัม

มวลโมเลกุล : 184 - 190 กรัม/โมล

ความหนืดที่ 25 องศาเซลเซียส : 12.0 - 14.0 พาสคัล-วินาที

ความหนาแน่น : 1.16 กิโลกรัม/ลิตร

ความหนืด

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ความหนืด (พาสคัล-วินาที)

20

32

30

6.0

40

1.5

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด (พาสคัล-วินาที)
50	0.56
60	0.24
70	0.12

### 3. สารทำแข็งของเรซินอีพ็อกซี (200B)

<u>ส่วนประกอบ</u>	<u>อัตราส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)</u>
Mercaptan terminated polymer	50 - 60
Tertiary Amine	5 - 15
Polyamide resin	10 - 25
Benzyl Alcohol	1 - 5
Aliphatic Amine	1 - 15

**ภาคผนวก ข**  
**การวิเคราะห์และการคำนวณค่าการนำไฟฟ้า**

1. การวิเคราะห์และการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบ

1.1 การวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบ

จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง 4 point probe โดยกำหนดกระแสแสดงที่ป้อนไปยังชิ้นงาน และวัดความต่างศักย์ที่ได้นำมาคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบสามารถหาได้จากสมการที่ ก-1 ดังนี้

$$\sigma = (I \times C.D.) / (2 \times \pi \times s \times \Delta V) \quad (\text{ก-1})$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนส์/เซนติเมตร)

C.D. คือ ตัวปรับค่าให้ถูกต้องเนื่องจากความหนาของชิ้นงานแสดงในตารางที่ ก-1

$\pi$  คือ 3.14

S คือ ระยะห่างระหว่าง probe มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

$\Delta V$  คือ ความต่างศักย์ที่วัดได้ (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้า probe (แอมแปร์)

ตารางที่ ก-1 ตัวปรับค่าให้ถูกต้องเนื่องจากความหนาของชิ้นงาน [34]

s/w	C.D.	s/w	C.D.	s/w	C.D.	s/w	C.D.
0.1	1.0009	0.5	1.0939	0.9	1.4008	1.6	2.241
0.2	1.007	0.6	1.1512	1	1.5045	1.8	2.5083
0.3	1.0227	0.7	1.2225	1.2	1.7329	2	2.7799
0.4	1.0511	0.8	1.3062	1.4	1.9809	2.5	3.4674

s/w คืออัตราส่วนระหว่างระยะ probe (s) และความหนาของชิ้นงานทดสอบ (w)



## 1.2 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบ

ตัวอย่างจากชิ้นงานคอมพอสิตของ DBSA-PAN/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี โดยมี สัดส่วน DBSA-PAN ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก

กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้า probe (I) = 99.99 มิลลิแอมแปร์

ความต่างศักย์ที่วัดได้ ( $\Delta V$ ) = 2.457 มิลลิโวลต์

ชิ้นงานมีความหนา 3 มิลลิเมตรดังนั้น  $s/w = 1/3 = 0.33$  หาค่า C.D. โดยการ interpolate ค่าในตารางในช่วง 0.3 – 0.4 ได้ดังนี้

$$C.D. = 1.0227 + (0.33-0.3) \times (1.0511-1.0227) / (0.4-0.3) = 1.0192$$

$$\text{จาก } \sigma = (I \times C.D.) / (2 \times \pi \times s \times \Delta V)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= ((99.99) \times (1.0192)) / (2 \times (3.14) \times (0.1) \times (2.457)) \\ &= 66.05 \text{ ซีเมนต์/เซนติเมตร} \end{aligned}$$

## 2. การวิเคราะห์และการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน

### 2.1 การวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านระนาบ

จะทำการวิเคราะห์โดยการให้กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.1 – 2 แอมแปร์ ผ่านผิวหน้าของชิ้นงานที่มีพื้นที่ 1 เซนติเมตร  $\times$  1.3 เซนติเมตร ผ่านเนื้อชิ้นงานที่มีความหนา t มิลลิเมตร แล้วทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าบันทึกข้อมูล แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แล้วหาค่าความต้านทานจากความชันกราฟ ส่วนค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านคำนวณจากสมการ ก-2 – ก-3

$$ARS = (R_{\text{total}} - R_{\text{system}}) \times A \quad (\text{ก-2})$$

$$\sigma = t / ASR \quad (\text{ก-3})$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์/เซนติเมตร)

t คือ ความหนาของชิ้นงาน

ASR คือ ค่าความต้านทานพื้นผิวเฉพาะ (Areal specific resistance : ASR)

A คือ พื้นที่ผิวชิ้นงานที่ตั้งฉากกับกระแสที่ป้อน

$R_{total}$  คือ ความต้านทานที่การวัดขณะมีชิ้นงาน

$R_{system}$  คือ ความต้านทานที่การวัดขณะไม่มีชิ้นงาน

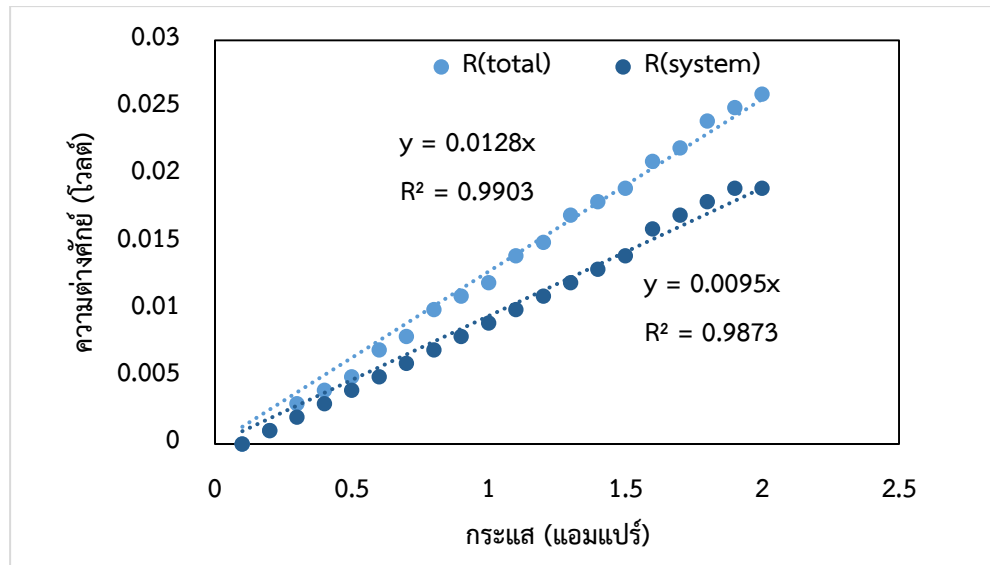
## 2.2 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านระนาบ

ตัวอย่างจากชิ้นงานคอมพอสิตของ DBSA-PAN/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี โดยมี สัดส่วน DBSA-PAN ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก

ข้อมูลจากการทดลอง

กระแส (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	กระแส (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)
0.1	0	1.1	0.014
0.2	0.001	1.2	0.015
0.3	0.003	1.3	0.017
0.4	0.004	1.4	0.018
0.5	0.005	1.5	0.019
0.6	0.007	1.6	0.021
0.7	0.008	1.7	0.022
0.8	0.01	1.8	0.024
0.9	0.011	1.9	0.025
1	0.012	2	0.026

นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้



ชั้นงานทดสอบหนา 1.6 มิลลิเมตร = 0.16 เซนติเมตร

พื้นที่ผิวสัมผัสกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า =  $1.3 \times 1 = 1.3$  ตารางเซนติเมตร

$R_{total} = 0.0128$  โอมต์

$R_{system} = 0.0095$  โอมต์

จากสมการ

$$ARS = (R_{total} - R_{system}) \times A$$

$$= (0.0128 - 0.0095) \times 1.3 = 0.00429$$

จุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\sigma = t / ASR_{ล้อย} = 0.16 / 0.00429 = 39.23 \text{ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

## ภาคผนวก ค

## การวิเคราะห์และการคำนวณค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง

## 1. การวิเคราะห์ภาวะในการทดสอบที่ใช้

โดยในการทดสอบแบบ 3-point bending เราจำเป็นต้องหาขนาด span length และความเร็วของหัวกด ซึ่งตาม ASTM D790-03 พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการกดอัดแบบร้อนจะต้องมีระยะ span length เท่ากับ 16 เท่าของความหนา และความเร็วหัวกดสามารถคำนวณได้จากสมการ ข-1 ดังนี้

$$R = (ZL^2) / 6d \quad (\text{ข-1})$$

โดยที่	R	คือ ความเร็วหัวกด (มิลลิเมตรต่อนาที)
	Z	คือ 0.01
	L	คือ span length (มิลลิเมตร)
	d	คือความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

## 2. การคำนวณภาวะในการทดสอบที่ใช้

หาค่าความเร็วหัวกดจากสมการ ข-1 โดยชิ้นงานหนา 3 มิลลิเมตร และ span length เท่ากับ  $16 \times 3 = 48$  มิลลิเมตร

จากสมการ  $R = (ZL^2) / 6d$

$$R = (0.01) \times (48)^2 / (6 \times 3) = 1.28 \text{ มิลลิเมตรต่อนาที}$$

## 3. การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง

ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural strength) สามารถหาได้จากสมการที่ ข-2 โดยนำเอาแรงที่มากที่สุดในการทดสอบจนชิ้นงานเกิดการแตกหักมาคำนวณ

$$\sigma_f = 3PL / (2bd^2) \quad (\text{ข-2})$$

โดยที่ $\sigma_f$	คือ ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural strength) (เมกะพาสคัล)
P	คือ แรงที่มากที่สุดในการทดสอบจนชิ้นงานเกิดการแตกหัก (นิวตัน)
L	คือ span length (มิลลิเมตร)
d	คือ ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
b	คือ ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

#### 4. การคำนวณค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง

ตัวอย่างจากชิ้นงานคอมพอสิตของ DBSA-PAN/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี โดยมีสัดส่วน DBSA-PAN ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก

แรงที่มากที่สุดในการทดสอบจนชิ้นงานเกิดการแตกหัก (P)	= 16.25 นิวตัน
span length (L)	= 48 มิลลิเมตร
ความหนาของชิ้นงาน (d)	= 1.8 มิลลิเมตร
ความกว้างของชิ้นงาน (b)	= 12.5 มิลลิเมตร

จากสมการ  $\sigma_f = 3PL / (2bd^2)$

$$= (3 \times 16.25 \times 48) / (2 \times 12.5 \times (1.8)^2) = 28.89 \text{ เมกะพาสคัล}$$

## ภาคผนวก ง

## การวิเคราะห์และการคำนวณค่าการดูดซึมน้ำ

## 1. การวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำ

การวัดค่าดูดซึมน้ำของคอมพอสิตจะใช้วิธีการตาม ASTM D570-98 [26] โดยจะนำชิ้นงานคอมพอสิตมาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นให้ท่วมชิ้นงานทั้งหมดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผ้าฝ้ายแห้งมาซับน้ำส่วนเกินออกจากชิ้นงานแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเปียกบันทึกค่า ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำสามารถหาได้จากสมการที่ ค-1

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = ( \text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง} ) \times 100 / \text{น้ำหนักแห้ง} \quad (\text{ค-1})$$

## 2. การคำนวณค่าการดูดซึมน้ำ

ตัวอย่างจากชิ้นงานคอมพอสิตของ DBSA-PAN/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี โดยมีสัดส่วน DBSA-PAN ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก

$$\text{น้ำหนักแห้งชิ้นงาน} = 4.368 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักเปียกชิ้นงาน} = 4.4101 \text{ กรัม}$$

จากสมการ ค-1 แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} &= ((4.4101 - 4.368) \times 100) / 4.368 \\ &= 0.964 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก จ

## การวิเคราะห์และการคำนวณค่าความเป็นรูพรุน

## 1. การวิเคราะห์และการคำนวณค่าความเป็นรูพรุน

การหาความเป็นรูพรุนในชิ้นงานคอมพอสิตได้ทำการทดสอบโดยใช้วิธีตาม ASTM C20-00 [27] ขั้นตอนแรกนำชิ้นงานคอมพอสิตไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนักแห้ง (D) หลังจากนั้นนำชิ้นงานคอมพอสิตต้มในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นจนอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องแล้วนำไปแช่ในน้ำต่อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักในน้ำเพื่อหาน้ำหนักลอยตัว (S) (สามารถดูได้จากรูปที่ 3.5) และต่อจากนั้นนำชิ้นงานมาเช็ดหยดน้ำออกจากผิวชิ้นงานด้วยผ้าไหมหรือผ้าฝ้ายที่ชุ่มด้วยน้ำ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักอิมมัตว (W) แล้วนำข้อมูลน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาค่ารูพรุนปรากฏ (apparent porosity : P) จากสมการ ง-1

$$P, \% = (W - D)/(W - S) \times 100 \quad (\text{ง-1})$$

## 2. การคำนวณค่าความเป็นรูพรุน

ตัวอย่างจากชิ้นงานคอมพอสิตของ DBSA-PAN/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี โดยมีสัดส่วน DBSA-PAN ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก  
 ผลจากการชั่งน้ำหนักได้ดังนี้

น้ำหนักแห้ง (D) = 4.368 กรัม

น้ำหนักลอยตัว (S) = 2.2050 กรัม

น้ำหนักอิมมัตว (W) = 4.4101 กรัม

จาก

$$P, \% = (W - D)/(W - S) \times 100$$

แทนค่าในสมการ ง-1

$$\begin{aligned} P, \% &= (4.4101 - 4.36)/(4.4101 - 2.2050) \times 100 \\ &= 1.91 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ฉ

## การวิเคราะห์และการคำนวณค่าความหนาแน่น

## 1. การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่นของชิ้นงานคอมพอสิตสามารถทำได้โดยนำชิ้นงานไปอบแห้งที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นทำการวัดปริมาตรโดยการแทนที่น้ำของชิ้นงานแล้วนำค่าน้ำหนักแห้งและปริมาตรแล้วคำนวณหาความหนาแน่นจากสมการที่ จ-1

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน}}{\text{ปริมาตรชิ้นงาน}} \quad (\text{จ-1})$$

## 2. การคำนวณค่าความหนาแน่น

ตัวอย่างจากชิ้นงานคอมพอสิตของ DBSA-PAN/แกรไฟต์/เรซินอีพ็อกซี โดยมีสัดส่วน DBSA-PAN ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และเรซินอีพ็อกซีร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก

$$\text{น้ำหนักแห้ง} = 4.0319 \text{ กรัม}$$

$$\text{ปริมาตร} = 2.2 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จาก } \text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน}}{\text{ปริมาตรชิ้นงาน}}$$

$$= 4.0319 / 2.2 = 1.83 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติพงษ์ เรือนคำ เกิดเมื่อวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเซียงกลาง “ประชาพัฒนา” จังหวัดน่าน สำเร็จ การศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2556 และเข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2560

