สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตแบบสองชั้นฐานแกรไฟต์ที่เตรียมโดยการผสมผงแกรไฟต์กับสารช่วยยึดเกาะ เช่น พอลิเอสเทอร์เรซินและฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน โดยศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต

4.1 สมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและสารเติมแต่ง

จากการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวสัมผัส และขนาดรูพรุนของผงแกรไฟต์ (เกรด RGN – C จากบริษัทสุธียูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด) ซึ่งเป็นสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน (ปริมาณร้อยละคาร์บอนคงที่ 82.84 และขนาดอนุภาคโดยรวมที่ 0.432 ไมโครเมตร) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน อาศัยหลักการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 Adsorption) พบว่า ผงแกรไฟต์มีพื้นที่ผิว (BET surface area) 10.95 ตารางเมตรต่อกรัม จากข้อมูลทางบริษัทผู้ผลิตเส้นใยคาร์บอน (เกรด PAN AGM 94) พบว่า เส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิว 0.99 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผงแกรไฟต์ประมาณ 10 เท่า

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของผงแกรไฟต์และสารเติมแต่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

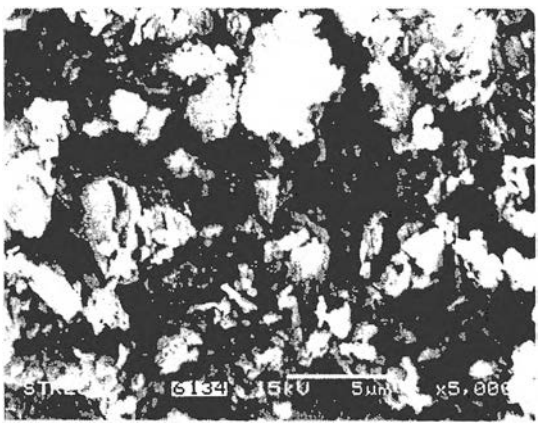
ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของผงแกรไฟต์และสารเติมแต่ง

สารเคมี	ผงแกรไฟต์	เส้นใยคาร์บอน	TiO_2	ZnSt
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.88	0.51	1.44	0.43

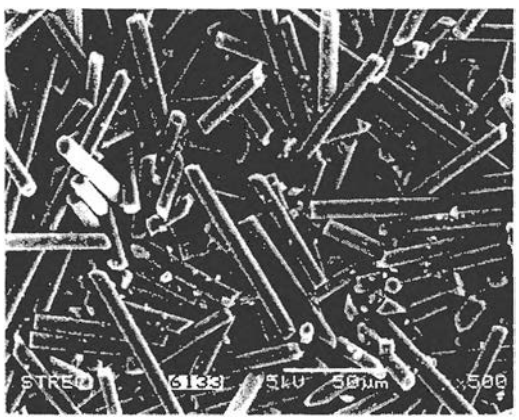
จากตารางที่ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นของผงแกรไฟต์และสารเติมแต่งมีค่าเรียงตามลำดับดังนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ > ผงแกรไฟต์ > เส้นใยคาร์บอน > ซิงก์สเตียเรท

นอกจากนี้ จากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต พบว่า ความหนาแน่นของพอลิเอสเทอร์ที่ 20 องศาเซลเซียสมีค่า 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินที่ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของผงแกรไฟต์และสารเติมแต่งซึ่งเป็นข้อมูลจากทางบริษัทผู้ผลิต แสดงในภาคผนวก ก.

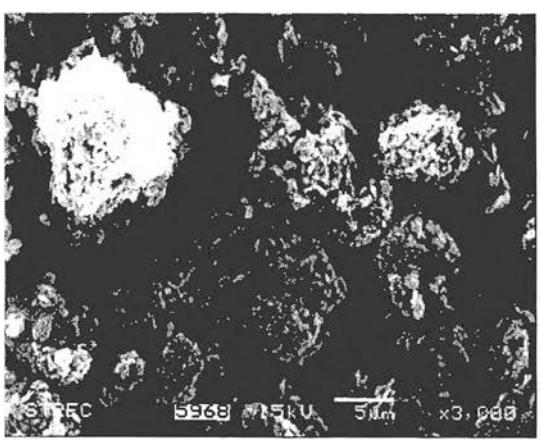
โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผงแกรไฟต์และสารเติมแต่งที่ศึกษาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope แสดงดังรูปที่ 4.1



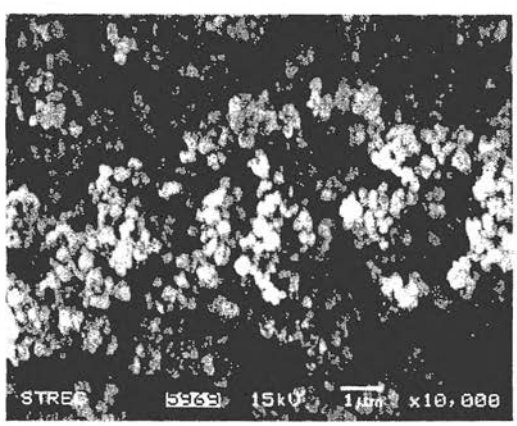
ก) ผงแกรไฟต์



ข) เส้นใยคาร์บอน



ค) ซิงก์สเตียเรท



ง) ไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและสารเติมแต่ง : ก) ผงแกรไฟต์ (ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า) ข) เส้นใยคาร์บอน (ที่กำลังขยาย 500 เท่า) ค) ซิงก์สเตียเรท (ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า) และ ง) ไททาเนียมไดออกไซด์ (ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า)

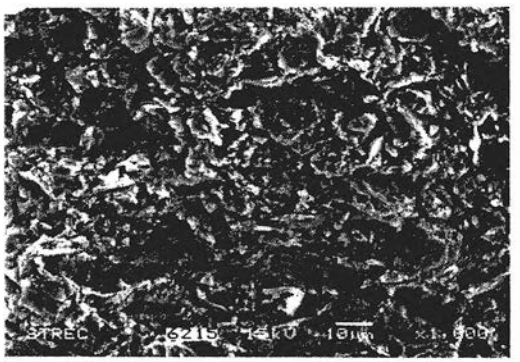
จากรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและสารเติมแต่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ผงแกรไฟต์มีลักษณะเป็นเกล็ด พื้นผิวค่อนข้างเรียบ เส้นใยคาร์บอนมีลักษณะเป็นแท่งกลมยาว พื้นผิวเรียบ ซิงก์สเตียเรทมีลักษณะเป็นลิ่ม พื้นผิวค่อนข้างขรุขระ และไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กที่จับตัวกันเป็นกลุ่มๆ

4.2 การศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะ

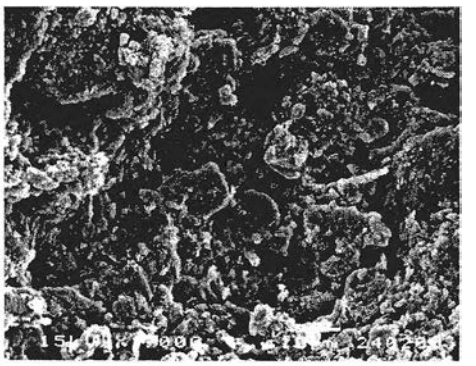
ในการผสมผงแกรไฟต์กับสารช่วยยึดเกาะทั้ง 3 ชนิดคือ พอลิเอสเทอร์เรซิน (POE), ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน (PhA) และเรซินผสมระหว่างพอลิเอสเทอร์และฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน (Mix resin) พบว่า ผงแกรไฟต์สามารถรวมตัวกับพอลิเอสเทอร์เรซินได้ดีกว่าฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน โดยผงแกรไฟต์สามารถรวมตัวกับพอลิเอสเทอร์เรซินได้ถึงร้อยละ 66 โดยไม่ต้องเติมตัวทำลายช่วยในการผสม ในขณะที่ผงแกรไฟต์สามารถรวมตัวกับฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินได้ร้อยละ 63 สำหรับเรซินผสมที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินนั้น พบว่า สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้เมื่อร้อยละของฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินมีค่าคงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณของแอลคิดส์เรซินเพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถคงรูปและแข็งตัวได้ ผงแกรไฟต์สามารถรวมตัวกับเรซินผสมที่มีปริมาณฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (10% PhA) ได้ร้อยละ 63 โดยไม่เติมตัวทำละลายช่วยในการผสม

4.2.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

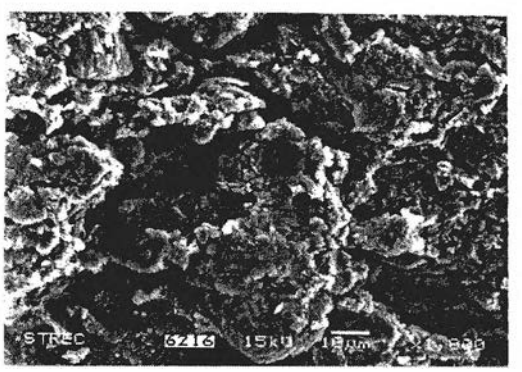
เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซิน ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน และเรซินผสม ที่ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 63 โดยน้ำหนักเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ผงแกรไฟต์สามารถกระจายตัวและรวมกับพอลิเอสเทอร์เรซินรวมทั้งเรียงตัวเชื่อมต่อกันในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่าการรวมตัวกับฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินและเรซินผสม โดยพิจารณาจากพื้นผิวของแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้ซึ่งมีความเรียบ สม่ำเสมอและไม่พบการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของผงแกรไฟต์ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าความหนืดที่แตกต่างกันของเรซินทั้งสอง โดยพอลิเอสเทอร์เรซินมีค่าความหนืดประมาณ 400 – 600 เซนติพอยส์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความหนืดของฟีนอลิกโมดิฟายส์แอลคิดส์เรซิน (ประมาณ 2000 – 5000 เซนติพอยส์) จากสมบัติการเข้ากันได้ดี (Compatible) ของผงแกรไฟต์กับพอลิเอสเทอร์นี้ จึงสามารถผสมผงแกรไฟต์ลงในพอลิเอสเทอร์ได้ในปริมาณที่มากกว่าการผสมลงในฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินและเรซินผสม (10% PhA) โดยการผสมผงแกรไฟต์ลงในพอลิเอสเทอร์จะอิ่มตัวที่ร้อยละ 66 ในขณะที่ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินและเรซินผสมจะอิ่มตัวที่ร้อยละ 63 ในทางทฤษฎีแล้ว การเลือกพอลิเมอร์สำหรับใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะควรเลือกให้มีค่าความหนืดต่ำ มีความสามารถในการดูดและรวมตัวกับสารเติมแต่งปริมาณมากได้โดยไม่เกิดการแยกตัวหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [8] ดังนั้นพอลิเอสเทอร์เรซินจึงสามารถรวมตัวกับผงแกรไฟต์ได้ในปริมาณที่มากกว่าฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน



ก) พอลิเอสเทอร์เรซิน



ข) ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน



ค) เรซินผสม (10% PhA)

รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต ที่ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 63 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะที่แตกต่างกัน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ก) พอลิเอสเทอร์เรซิน ข) ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน และ ค) เรซินผสม (10% PhA)

4.2.2 สมบัติการนำไฟฟ้า

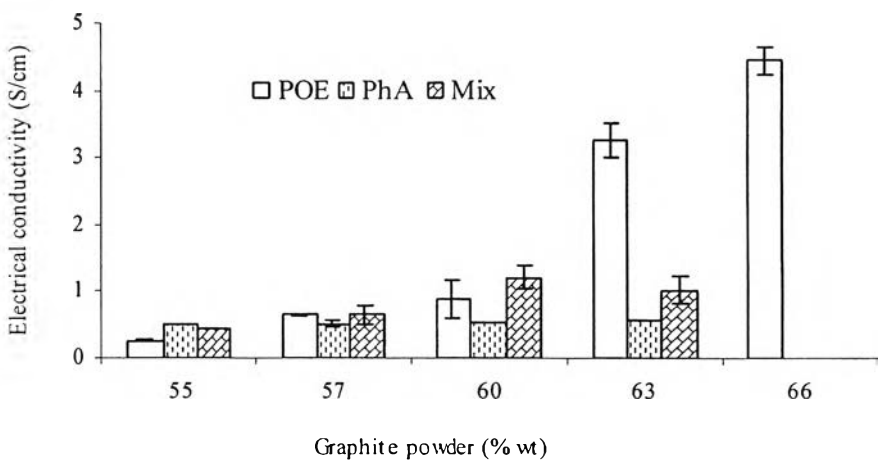
เมื่อนำชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตมาทดสอบค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบตามมาตรฐาน ASTM C611 – 98 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อปริมาณแกรไฟต์ในชิ้นงานมีค่าร้อยละ 55 – 60 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซิน ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน และเรซินผสม จะมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกันประมาณ 0.2 – 0.8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เมื่อน้ำหนักของผงแกรไฟต์มีค่ามากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะจะมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ใช้ โดยจะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 4.52 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินจะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 0.57 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตรที่ปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 63 โดยที่ปริมาณของผงแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลน้อยมากต่อค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน

และเรซินผสม จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 1.21 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และลดลงเล็กน้อยเมื่อผสมที่ปริมาณแกรไฟต์อิ่มตัวร้อยละ 63 เมื่อพิจารณาสารช่วยยึดเกาะแต่ละชนิด พบว่า เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นผลเฉพาะในชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์และเรซินผสมบางช่วง เนื่องจากเมื่อปริมาณผงแกรไฟต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณสารนำไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงข่ายการนำไฟฟ้าหรือโครงข่ายการซึมผ่าน (Percolation network) ของอนุภาคแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้อย่างต่อเนื่อง โครงข่ายการซึมผ่านนี้ประกอบด้วยสายโซ่ของอนุภาคนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน เพื่อให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนเกิดได้ง่าย อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างของแกรไฟต์คอมโพสิตได้ดีขึ้น โดยทั่วไปปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าในแกรไฟต์คอมโพสิตได้แก่ ขนาดอนุภาคของแกรไฟต์ การกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ รวมทั้งความสามารถในการรวมตัวและเกิดเป็นของผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture) กับเรซิน [8] เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 พบว่าแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะนั้น แกรไฟต์สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ไม่เกิดการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนและให้โครงสร้างที่มีพื้นผิวเรียบ สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะจะมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซิน และเรซินผสม

ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuan และคณะ [17] เมื่อปริมาณผงแกรไฟต์ในฟีนอลิกโนโวแลกอีพอกซี – เบสไวนิลเอสเทอร์ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงจาก 2,000 มิลลิโอห์ม เป็น 5.8 มิลลิโอห์ม

สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นนำกระแสที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม กรมพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา ได้ตั้งค่าเป้าหมายไว้ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร [20] จากผลค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้พบว่า ยังมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้อยู่มาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนการผสมก่อนขึ้นรูปและการนำวัตถุดิบมาใส่ในแม่พิมพ์มีผลต่อการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้เกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของโครงข่ายการนำไฟฟ้าเท่าที่ควร ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจึงมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Huang และคณะ [20] ซึ่งใช้กระบวนการเวทเลย์ (Wet – lay) ในขั้นตอนการผสม พบว่าที่ปริมาณแกรไฟต์ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 65) ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้มีค่า 230 ซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากกระบวนการเวทเลย์ที่ใช้นั้น ช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวเชื่อมต่อกันของผงแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของชิ้นงานมีค่าสูงและผ่านค่าเป้าหมายของกรมพลังงานสหรัฐอเมริกา

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cho และคณะ [26] คอมโพสิตเอและคอมโพสิตบีมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.008 และ0.007 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (หรือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 131.1 และ 151.6 โอห์ม-เซนติเมตร) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้แต่สามารถนำไปใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มได้ โดยมีค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) ประมาณ 0.9 – 1 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และสามารถทำงานได้นาน 500 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนักเมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ

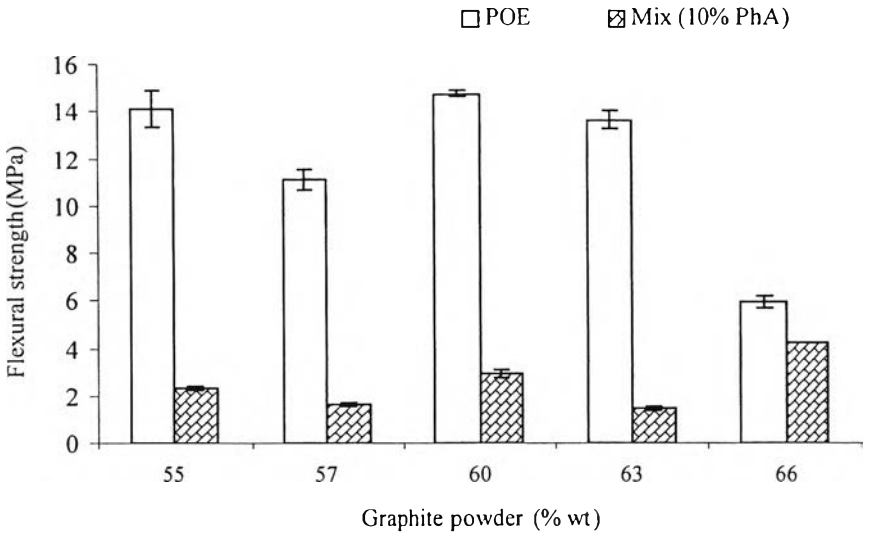
จากค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำของชิ้นงานที่ใช้ฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ จึงไม่ได้นำมาทดสอบสมบัติอื่นๆ ต่อไป แต่จะเลือกทดสอบเฉพาะชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินและเรซินผสมเท่านั้น

4.2.3 สมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกลของแกรไฟต์คอมโพสิตจะศึกษาจากค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D790 - 03 และค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี (Durometer hardness type B) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2240 – 04 ผลของสมบัติเชิงกลแสดงดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 พบว่าชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะจะมีค่าความแข็งแรงดัดมากกว่าชิ้นงานที่ใช้เรซินผสม โดยมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 14.74 เมกกะพาสคัลที่ปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 60 ในขณะที่เรซินผสม มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุดเท่ากับ 2.93 เมกกะพาสคัลที่ปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 60 ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของพอลิเอสเทอร์เรซินเมื่อเกิดการเชื่อมโยงและแข็งตัวแล้ว จะมีค่าความแข็งแรงดัดประมาณ 55 เมกกะพาสคัล และสมบัติทางกายภาพของฟีนอลิกเรซินซึ่งมีค่าความแข็งแรงดัดประมาณ 40 เมกกะพาสคัล ทำให้เมื่อขึ้นรูปแล้วจะมีความเปราะมากกว่าพอลิเอสเทอร์เรซิน [27] นอกจากนี้ ผลจากการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ อาจให้สมบัติของเรซินผสมที่ได้เกิดการหักล้างกัน ทำให้ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานที่ใช้เรซินผสม (10% PhA) มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์มาก รวมทั้งความสามารถในการกระจายตัวและรวมตัวของผงแกรไฟต์เพื่อให้เกิดเป็นของผสมเนื้อเดียวกับเรซินผสมมีค่าต่ำ การเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทำให้เกิดช่องว่างและรูพรุนภายในโครงสร้างของแกรไฟต์คอมโพสิต เป็นผลให้ความสามารถในการกระจายแรงกระทำจากภายนอกและเสถียรภาพภายในโครงสร้างลดลง ค่าความแข็งแรงดัดจึงมีค่าน้อย [17]

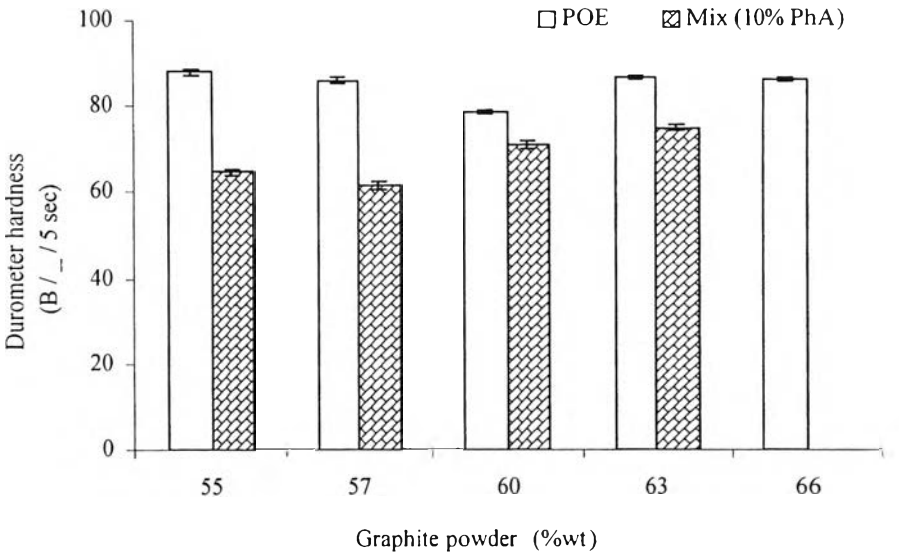
นอกจากนี้ ทั้งชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์และเรซินผสม (10% PhA) เป็นสารช่วยยึดเกาะ มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงดัดจะมีค่าลดลง โดยจะเห็นชัดเจนในชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารยึดเกาะ เมื่อปริมาณผงแกรไฟต์เพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดัดจะมีค่าลดลง เนื่องจากภาวะของการยึดติดระหว่างผงแกรไฟต์และเรซินจะลดความแน่นหนาลงเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuan และคณะ [17] เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดัดจะมีค่าลดลงจาก 38.47 เมกกะพาสคัลเป็น 27.3 เมกกะพาสคัล



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ

ผลจากการทดสอบค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะจะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์มากกว่าชิ้นงานที่ใช้เรซินผสม (10% PhA) โดยชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์จะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์อยู่ในช่วง B/ 78.6 – 88.1 / 5sec และชิ้นงานที่ใช้เรซินผสม จะให้ค่าความแข็งอยู่ในช่วง B/61.5 – 75 / 5sec นอกจากนี้ ชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะนั้น เมื่อปริมาณผงแกรไฟต์เพิ่มขึ้นค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เรซินผสมนั้น เมื่อปริมาณผงแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อปริมาณผงแกรไฟต์เพิ่มขึ้น สมบัติทางกายภาพของแกรไฟต์จะช่วยให้ความแข็งของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น [27]

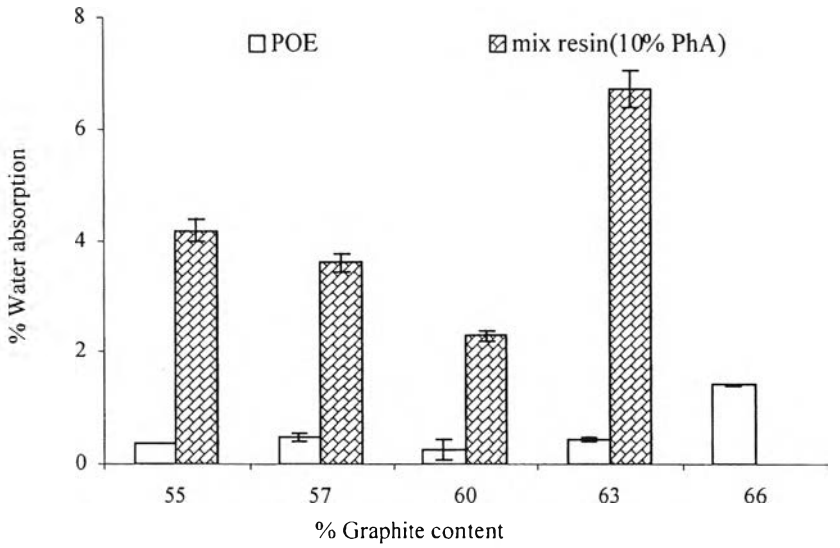
ในการนำแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตไปใช้เป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว จำเป็นต้องมีการเซาะร่องภายในแผ่นเพื่อให้เกิดช่องทางการไหลของแก๊ส ดังนั้นแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้ไม่ควรมีความแข็งจนเกินไป อย่างไรก็ตาม เกณฑ์มาตรฐานค่าความแข็งของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วยังไม่มีการรายงานอ้างอิงค่า



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์และร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนักเมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ

4.2.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

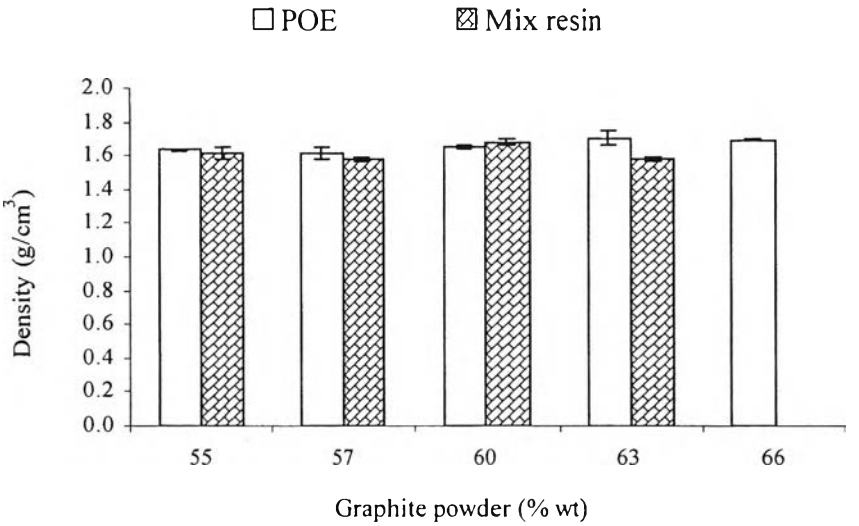
จากการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D570 – 98 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า ชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะจะมีร้อยละการดูดซึมน้ำ (%Water absorption) น้อยกว่าชิ้นงานที่ใช้เรซินผสม เนื่องจากฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินที่ใช้เป็นส่วนผสมร้อยละ 10 ในเรซินผสมนั้น มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH^-) ซึ่งแสดงความมีขั้วและสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำได้ [27] นอกจากนี้ จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 4.2 ภายในโครงสร้างของแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้เรซินผสมนั้น ปรากฏช่องว่างและรูพรุนอันเนื่องมาจากการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มของผงแกรไฟต์ ทำให้โมเลกุลของน้ำมีโอกาสแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของแกรไฟต์คอมโพสิตได้ ส่งผลให้ร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่ามาก อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ แม้จะให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ใช้เรซินผสม แต่ก็ยังไม่ผ่านเกณฑ์ค่าเป้าหมายสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว ซึ่งควรมีร้อยละของการดูดซึมน้ำน้อยกว่า 0.3 [4] และยังมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cho และคณะ [26] ยกเว้นชิ้นงานที่มีปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 60 จะให้ร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 0.25 ผ่านเกณฑ์ค่าเป้าหมาย



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ

4.2.5 ความหนาแน่น

การศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะที่มีต่อความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.62 – 1.71 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้เรซินผสม (10% PhA) จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.58 – 1.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และปริมาณผงแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ทั้งในชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินและเรซินผสม (10% PhA) ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันแม้จะใช้สารช่วยยึดเกาะต่างชนิดกัน เนื่องจากทั้งพอลิเอสเทอร์เรซินและฟีนอลิกโมดิฟายด์แอลคิดส์เรซินมีค่าความหนาแน่นที่ไม่แตกต่างกัน (1.03 และ1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากสารช่วยยึดเกาะทั้งสองมีค่าผ่านค่าเป้าหมายในงานวิจัยของ Cho และคณะ [26] และเกณฑ์มาตรฐานของกรมพลังงานงาน สหรัฐอเมริกา [3] ที่ระบุว่า ความหนาแน่นของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดคอมโพสิตควรมีความหนาแน่นไม่เกิน 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและร้อยละของผงแกรไฟต์โดยน้ำหนักเมื่อใช้สารช่วยยึดเกาะชนิดต่างๆ

4.3 การศึกษาผลของสารเติมแต่งพอลิเมอร์ (Polymer additives)

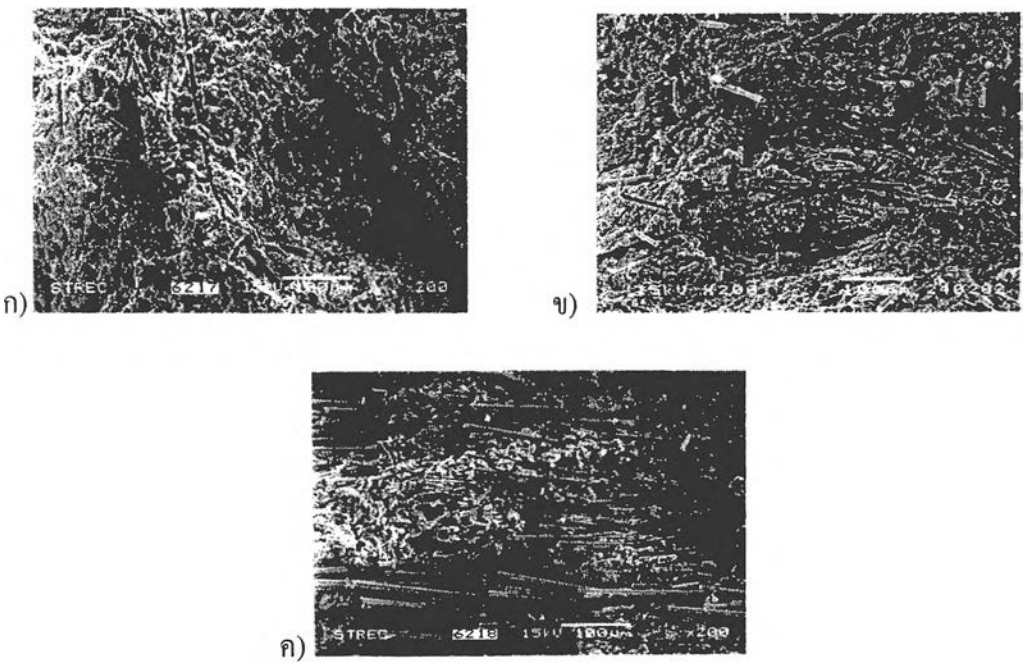
ในการพิจารณาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาเพื่อการใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วนั้น จะพิจารณาโดยเน้นที่สมบัติการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์คอมโพสิตเป็นสำคัญ ส่วนผสมใดที่ให้ค่าการนำไฟฟ้ามาก จะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสเกิดขึ้นได้ดี ช่วยลดค่าความต้านทานโอห์มมิก (Ohmic tesistance) ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น จากการศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะ ที่ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก จะให้การนำไฟฟ้าสูงที่สุดประมาณ 4.52 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ดังนั้น จึงเลือกพอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะ และปริมาณคาร์บอนโดยรวมที่ร้อยละ 66 เป็นสัดส่วนสำหรับศึกษาผลของสารเติมแต่ง ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงก์สเตียเรท โดยจะแยกศึกษาผลของสารเติมแต่งแต่ละตัว

4.3.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

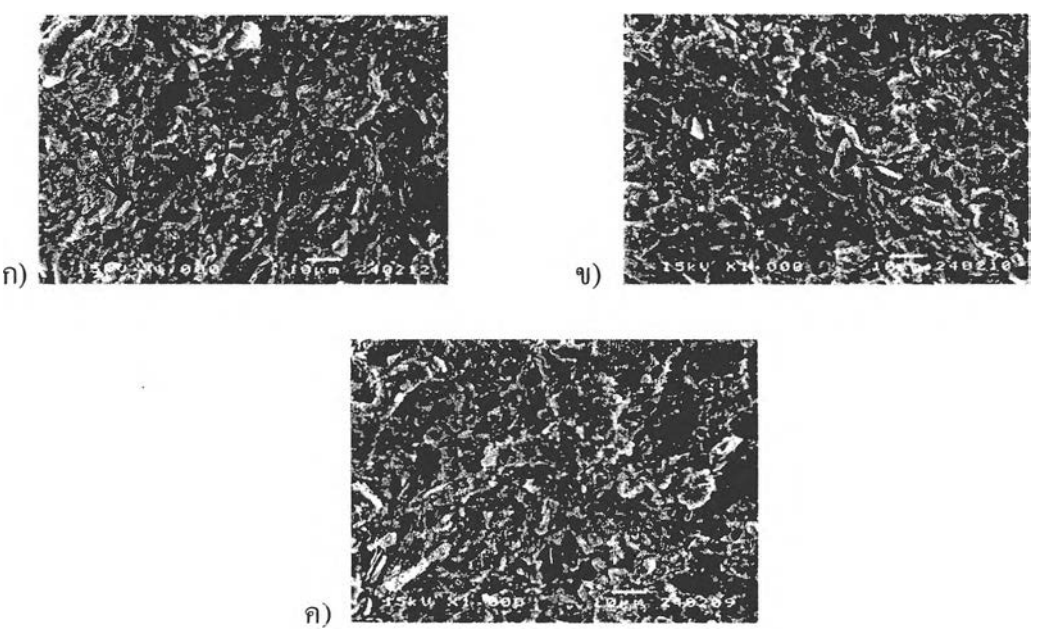
โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของเส้นใยคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.8 จะพบว่า เส้นใยคาร์บอนเกิดการกระจายและแทรกตัวอยู่ระหว่างผงแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยเมื่อเส้นใยคาร์บอนมีปริมาณน้อย (รูป 4.8 ก) จะพบการกระจายตัวภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์อย่างไม่เป็นระเบียบ และเส้นใยคาร์บอนแต่ละเส้นมีโอกาสสัมผัสกันน้อย เมื่อปริมาณของเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.8 ข – ค) จะพบว่ามีความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอนภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น เส้นใยคาร์บอนมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น และมีการเรียงในแนวขนานกับภาคตัดขวางของชิ้นงาน

โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดเล็ก (ลูกศรชี้) จะแทรกตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยจะกระจายและแทรกตัวอยู่ในบริเวณช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างผงแกรไฟต์ ทำให้ลดปริมาณรูพรุนภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่ามากขึ้น จะไม่พบความแตกต่างกันในโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็ก อีกทั้งยังใช้ในปริมาณที่น้อย (1 – 5 phr) แต่คาดว่าเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น อาจจะช่วยลดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้บ้าง

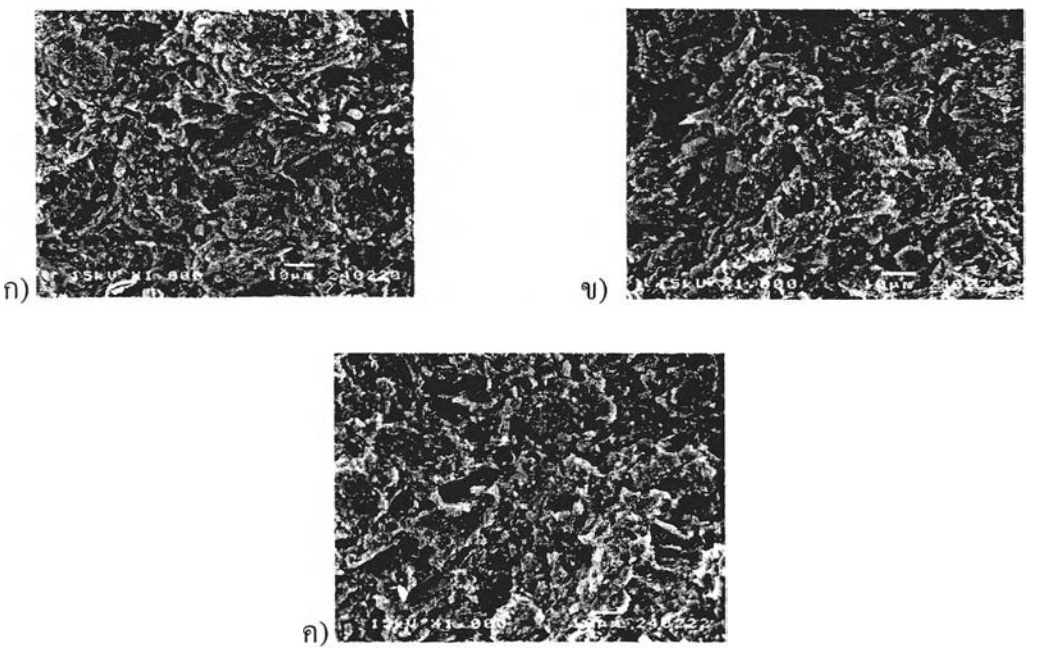
โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของซิงก์สเตียเรทแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า ซิงก์สเตียเรทซึ่งมีลักษณะเป็นลิ่ม ขนาดเล็ก (ลูกศรชี้) จะแทรกตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยจะกระจายและแทรกตัวอยู่ในบริเวณช่องว่าง หรือรูพรุนระหว่างผงแกรไฟต์ ทำให้ลดปริมาณรูพรุนภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เมื่อปริมาณซิงก์สเตียเรทมีค่ามากขึ้น อาจไม่พบความแตกต่างกันในโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา เนื่องจากซิงก์สเตียเรทมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังใช้ในปริมาณที่น้อย (1 – 5 phr)



รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของเส้นใยคาร์บอน ที่กำลังขยาย 200 เท่า : ก) เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก ข) เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10.4 โดยน้ำหนัก และ ค) เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า : ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 phr ข) ไทเทเนียม ไดออกไซด์ 3 phr และ ค) ไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 phr

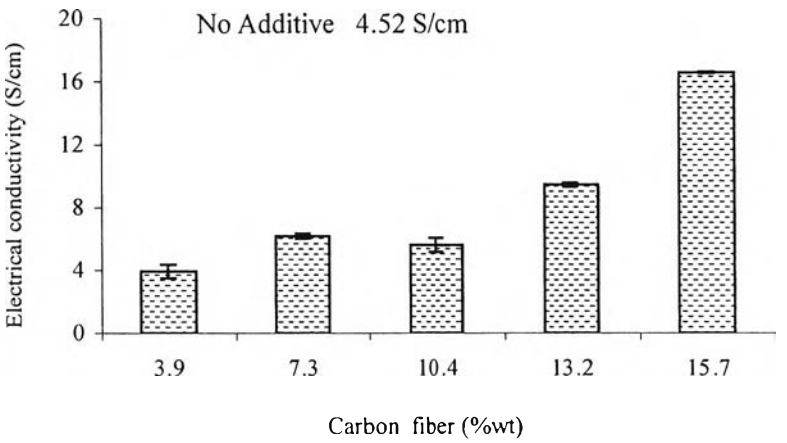


รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของซิงก์สเตียเรทที่กำลังขยาย 1,000 เท่า : ก) ซิงก์สเตียเรท 1 phr ข) ซิงก์สเตียเรท 3 phr และค) ซิงก์สเตียเรท 5 phr

4.3.2 สมบัติการนำไฟฟ้า

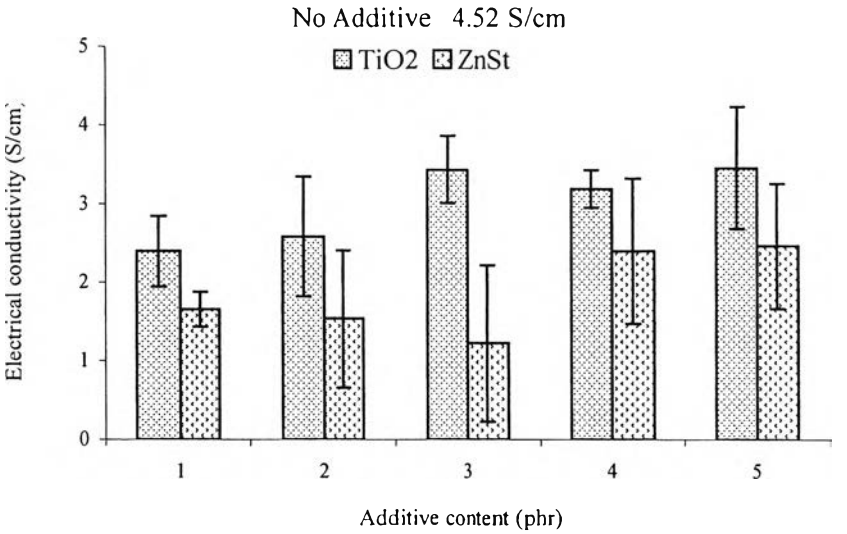
เมื่อนำชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตมาทดสอบค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 3.9 – 10.4โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 3.94 – 6.16 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนมีค่ามากกว่าร้อยละ 10.42 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 16.57 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตรที่เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.71 การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยคาร์บอนส่งผลให้เกิดความต่อเนื่องของโครงข่ายการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างของแกรไฟต์คอมโพสิตได้ดีขึ้น เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเส้นใยคาร์บอนแต่ละเส้น และเกิดการสัมผัสกันระหว่างเส้นใยคาร์บอนและผงแกรไฟต์ ซึ่งลักษณะการแทรกตัวของเส้นใยคาร์บอนในพอลิเมอร์เมทริกซ์แสดงดังรูป 4.8 ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wolf และคณะ [1] พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อปริมาณของเส้นใย

คาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3.5 เป็นร้อยละ 44 โดยปริมาตร ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.5 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและร้อยละของเส้นใยคาร์บอนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ ที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก

ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรท แสดงดังรูปที่ 4.12 จากรูปจะพบว่า เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรทลงในชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิทซึ่งมีสัดส่วนของแกรไฟต์ร้อยละ 66 และพอลิเอสเทอร์ร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของชิ้นงานมีค่าลดลงจากเดิม (ลดลงจาก 4.52 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 3 และ 5 phr จะให้ค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดประมาณ 3.45 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่ซิงก์สเตียเรทปริมาณ 5 phr จะให้ค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดประมาณ 2.46 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ดังนั้นจะพบว่า การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรทลงในส่วนผสมจะไม่ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและปริมาณของสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะ ที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก

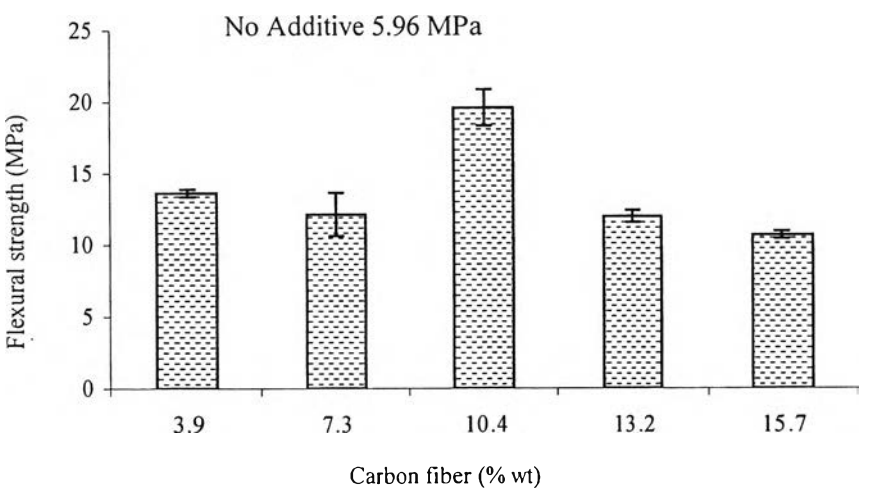
4.3.3 สมบัติเชิงกล

ค่าความแข็งแรงดัดและค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าความแข็งแรงดัดมากกว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมเส้นใยคาร์บอนโดยมีพอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมเท่ากัน โดยจากรูปที่ 4.4 จะพบว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่มีพอลิเอสเทอร์ร้อยละ 34 และปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงดัดเท่ากับ 5.96 เมกกะพาสคัล ในขณะที่ชิ้นงานที่เติมเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าความแข็งแรงดัดอยู่ในช่วง 10.67 – 19.61 เมกกะพาสคัล โดยชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุด คือชิ้นงานที่มีเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10.4 และผงแกรไฟต์ร้อยละ 55.6 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงดัดมีค่าเท่ากับ 19.61 เมกกะพาสคัล โดยปกติ นอกจากจะใช้เส้นใยคาร์บอนเป็นสารเติมแต่งที่ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการนำไฟฟ้าและการหล่อลื่น เส้นใยคาร์บอนยังจัดเป็นสารเสริมแรงประเภทเส้นใยที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต เนื่องจากในทางทฤษฎี ความเข้มของความเค้นถูกสมมติอยู่ให้ที่ปลายสุดของเส้นใยตรงขอบและมุมของอนุภาคและอยู่รอบแกนของอนุภาคทรงกลม ดังนั้นเส้นใยที่ยาวทำให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีเสถียรภาพในการกระจายของแรง

มากกว่าในอนุภาคทรงกลม [15] จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะพบเส้นใยคาร์บอนกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ พฤติกรรมดังกล่าวนี้ทำให้ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ประกอบด้วยเส้นใยคาร์บอนเมื่อได้รับแรงจากภายนอกจะสามารถกระจายแรงได้ดีกว่า ทำให้เกิดความเสถียรภายในโครงสร้าง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น

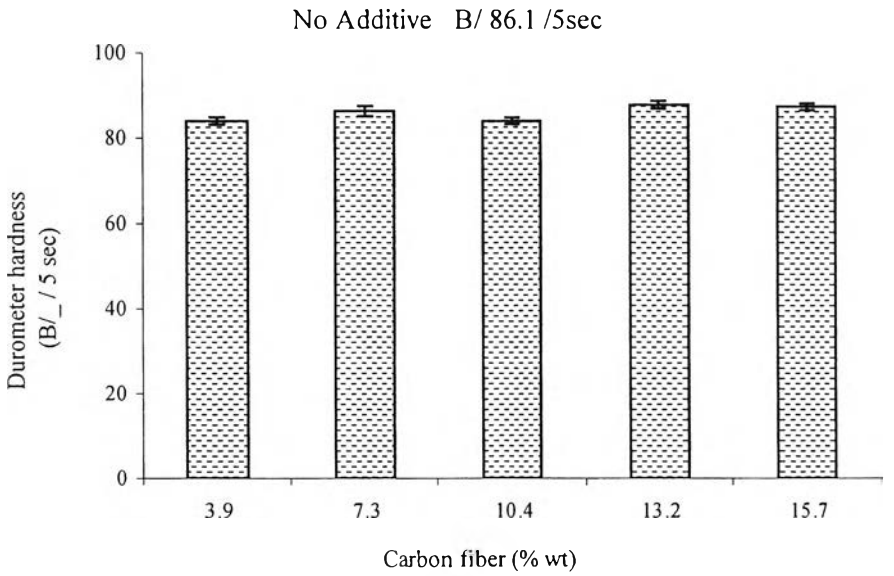
อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น (มากกว่าร้อยละ 10.4 โดยน้ำหนัก) ค่าความแข็งแรงดัดจะมีค่าลดลง จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.8 ค) เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 15.7 จะพบการรวมกันเป็นกลุ่มของเส้นใยคาร์บอน เป็นผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของเส้นใยคาร์บอนกับแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง การถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกภายในโครงสร้างของชิ้นงานทำได้น้อยลง เกิดพลังงานสะสมภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้นชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจึงมีค่าความแข็งแรงดัดลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีใกล้เคียงชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมเส้นใยคาร์บอนโดยมีพอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ ที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมเท่ากัน โดยจากรูปที่ 4.5 จะพบว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่มีพอลิเอสเทอร์ร้อยละ 34 และปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีเท่ากับ B/86.1/5sec ในขณะที่ชิ้นงานที่เติมเส้นใย

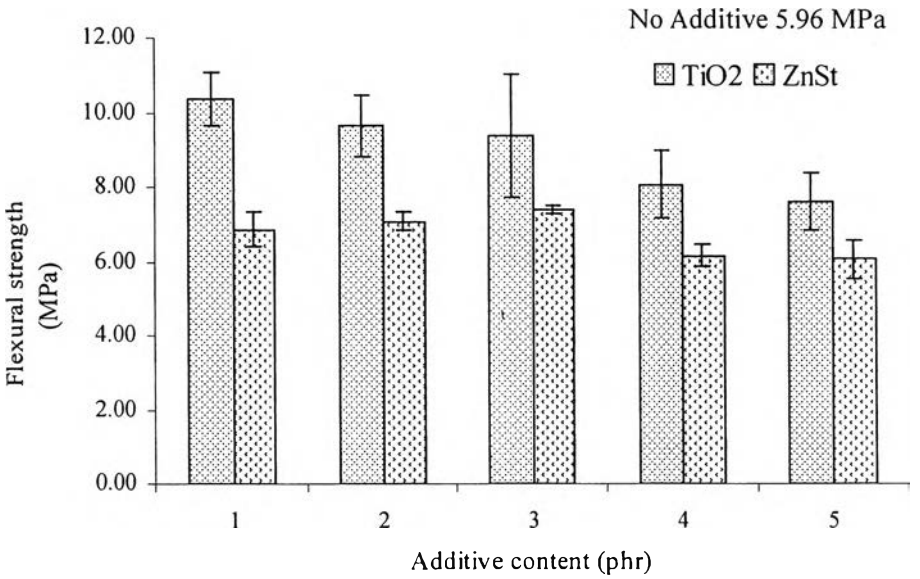
คาร์บอนจะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีอยู่ในช่วง B/84 – 87.8/5sec โดยชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมากที่สุด คือชิ้นงานที่มีเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 13.2 และผงแกรไฟต์ร้อยละ 52.8 โดยน้ำหนัก ความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมีค่าเท่ากับ B/87.8/5sec ทั้งนี้ปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาที่แสดงดังรูปที่ 4.8 ปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการรวมกันเป็นกลุ่มของเส้นใยคาร์บอนภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งทำให้โครงสร้างภายในที่ไม่มีความเสถียร ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกดมีค่าลดลง [17]



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก

ผลการศึกษาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์และปริมาณของซิงก์สเตียเรทที่มีต่อค่าความแข็งแรงดัดแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้น ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จะให้ค่าความแข็งแรงดัดอยู่ในช่วง 7.62 – 10.37 เมกกะพาสคัล มากกว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมเมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนักเท่ากัน โดยชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุด คือชิ้นงานที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 phr ความแข็งแรงดัดมีค่าเท่ากับ 10.37 เมกกะพาสคัล

สำหรับชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรทนั้นพบว่า ค่าความแข็งแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิงก์สเตียเรทอยู่ในช่วง 1- 3 phr และจะให้ค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุดที่ซิงก์สเตียเรทปริมาณ 3 phr โดยความแข็งแรงดัดมีค่าเท่ากับ 7.41 เมกกะพาสคัล นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรท (6.07 – 7.41 เมกกะพาสคัล) จะมีค่ามากกว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติม

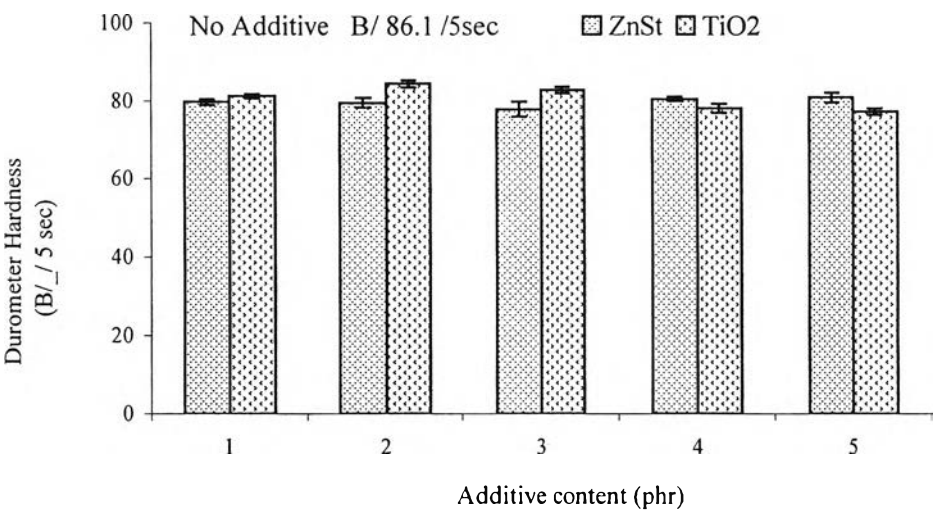


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก

ผลการศึกษาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์และปริมาณของซิงก์สเตียเรทที่มีต่อค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี (B/77.3 – 84.5/5sec) น้อยกว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมเมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะที่ปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนักเท่ากัน โดยชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมากที่สุด คือชิ้นงานที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 phr ความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมีค่าเท่ากับ B/84.5/5sec

สำหรับชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรทพบว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซิงก์สเตียเรทมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรทจะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี (B/77.9 – 81/5sec) น้อยกว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติม โดยชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมากที่สุด คือชิ้นงานที่มีซิงก์สเตียเรทปริมาณ 5 phr ความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมีค่าเท่ากับ B/81/5sec

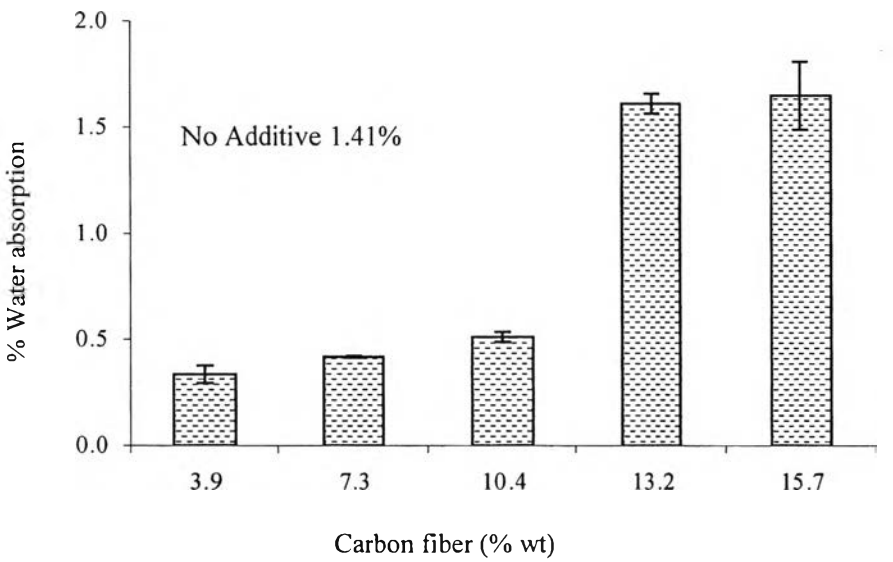
นอกจากนี้จะพบว่า ชิ้นงานที่เติมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ จะให้สมบัติเชิงกลของแกรไฟต์คอมโพสิตทั้งความแข็งแรงดัดและความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี มากกว่าชิ้นงานที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรท เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์มักใช้เป็นสารเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล ส่วนซิงก์สเตียเรทเป็นสารหล่อลื่นภายใน ซึ่งจุดมุ่งหมายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อให้เป็นสารที่ช่วยในการหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย สารหล่อลื่นภายในนี้ เมื่อใช้ในปริมาณที่ไม่เหมาะสมหรือมากเกินไป ในบางครั้งอาจทำให้สมบัติเชิงกลลดลงได้ [15]



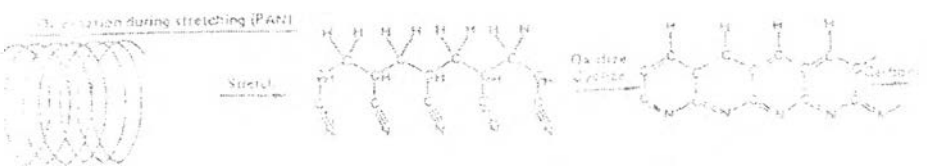
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก

4.3.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

เมื่อนำชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยคาร์บอนมาทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตจะมีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากภายในโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอนมีพันธะระหว่างไนโตรเจน – คาร์บอน และไฮโดรเจน - คาร์บอน ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงความมีขั้ว สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับพันธะไฮโดรเจน – ออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำได้ เมื่อเส้นใยคาร์บอนมีปริมาณมาก จึงทำให้เกิดการดูดซึมน้ำได้มาก ปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่ให้ค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน (น้อยกว่าร้อยละ 0.3) ของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว คือที่เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก มีร้อยละของการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.34



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและร้อยละของเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66



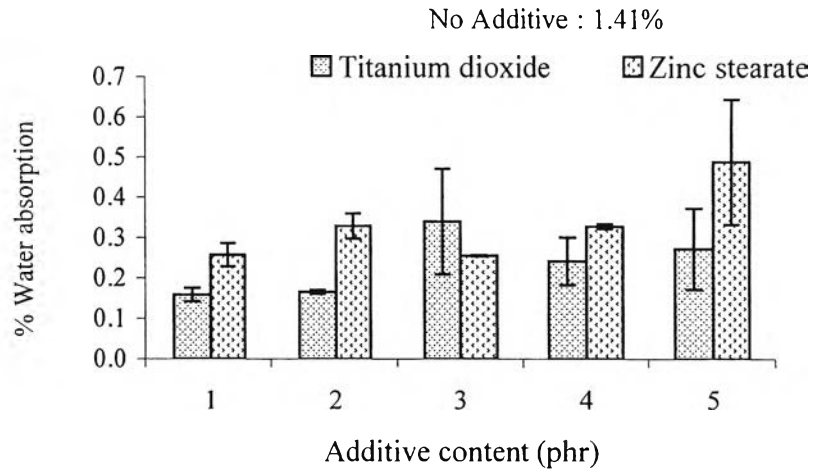
รูปที่ 4.18 โครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน [28]

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า แม้ปริมาณของเส้นใยคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ก็ทำให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนเกินค่าเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งเมื่อนำมาใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสในเซลล์เชื้อเพลิงอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้

ผลการศึกษาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์และปริมาณของซิงก์สเตียเรทที่มีต่อค่าการดูดซึมน้ำแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จะให้ค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำน้อยกว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติม จากรูปที่ 4.6 จะพบว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่มีพอลิเอสเทอร์ร้อยละ 34 และปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.41 เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 และ 2 phr จะให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน คือมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.16 และ 0.17 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 3 phr ร้อยละของการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.34 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน (น้อยกว่าร้อยละ 0.3) จากนั้นเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่ามากกว่า 3 phr ร้อยละของการดูดซับน้ำจะมีค่าลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานคือที่ 4 และ 5 phr จะมีร้อยละของการดูดซับน้ำเท่ากับ 0.24 และ 0.27 ตามลำดับ

สำหรับชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรทพบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรทจะให้ค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำน้อยกว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติม โดยซิงก์สเตียเรทที่ปริมาณ 1 – 4 phr จะให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 0.26 – 0.33 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน (น้อยกว่าร้อยละ 0.3) และเมื่อปริมาณซิงก์สเตียเรทเท่ากับ 5 phr ร้อยละของการดูดซับน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.49 ซึ่งมีค่าเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

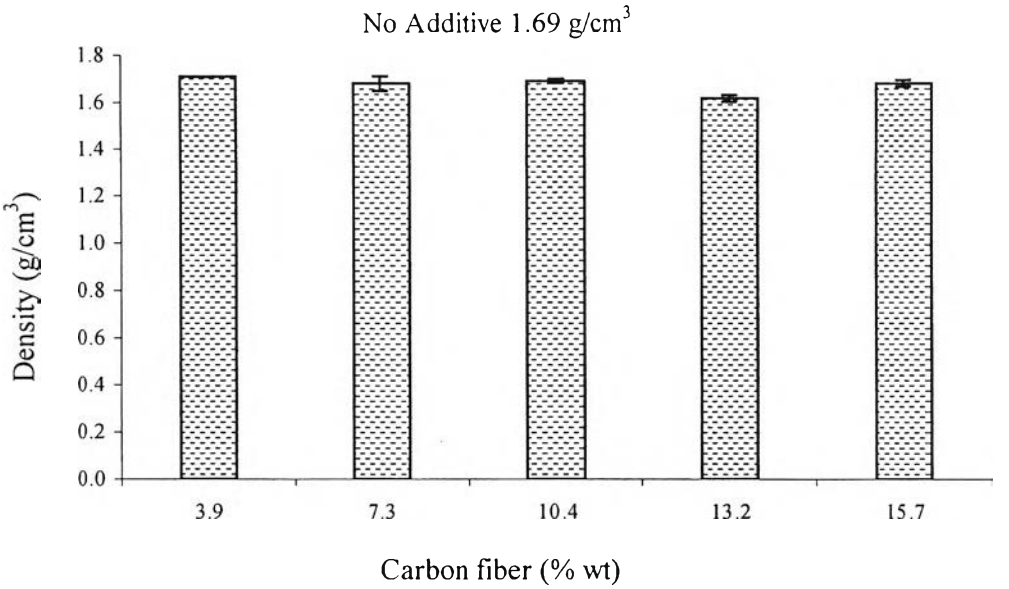
การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรทลงในชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต สามารถลดค่าร้อยละการดูดซึมน้ำได้ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรทมีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กและเป็นลิ่มขนาดเล็ก ตามลำดับ (รูปที่ 4.1 ค – ง) จึงสามารถแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (รูปที่ 4.9) ช่วยลดจำนวนช่องว่างภายในโครงสร้าง ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างได้ ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจึงลดลง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก

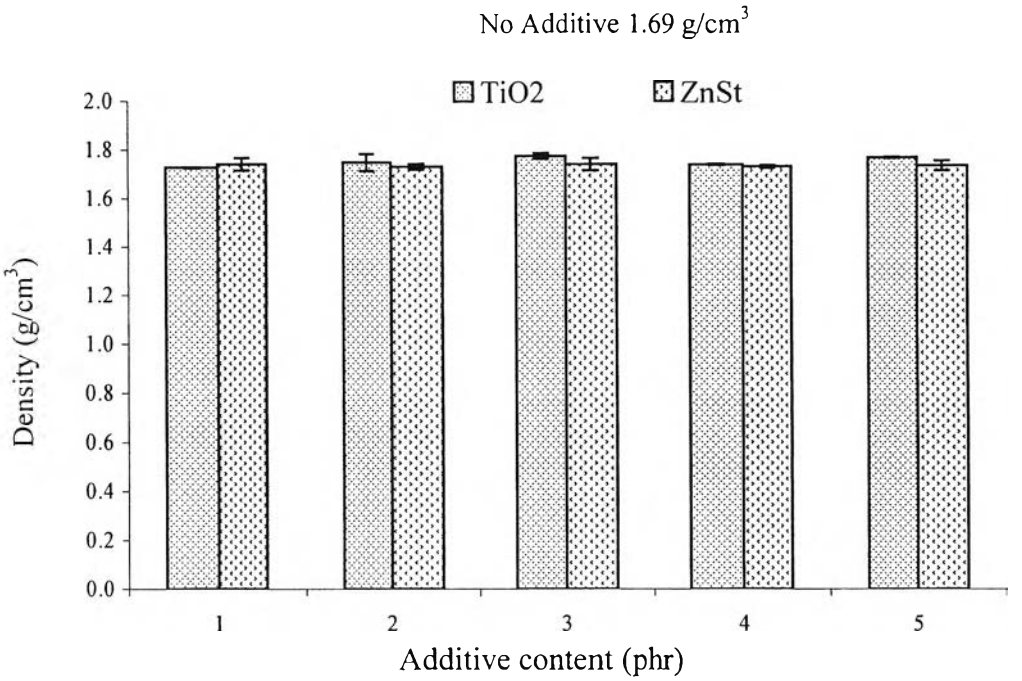
4.3.5 ความหนาแน่น

เมื่อนำชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยคาร์บอนมาทดสอบหาค่าความหนาแน่น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยคาร์บอน ส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมด้วยเส้นใยคาร์บอน (1.69 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมเส้นใยคาร์บอนจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.62 – 1.71 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิง [3, 26] ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก เส้นใยคาร์บอนมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าผงแกรไฟต์ (จากตารางที่ 4.1) อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของปริมาณผงแกรไฟต์ที่ใช้ในชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตต่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนพบว่า ผงแกรไฟต์ยังมีสัดส่วนอยู่ในปริมาณที่มาก ชิ้นงานส่วนใหญ่มีปริมาณผงแกรไฟต์มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (พอลิเอสเทอร์เรซินมีปริมาณคงที่ร้อยละ 34 โดยน้ำหนักในทุกชิ้นงาน) ดังนั้นแม้ว่าเส้นใยคาร์บอนจะเพิ่มปริมาณมากขึ้น จึงแทบจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและร้อยละของเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะ และมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66

ผลการศึกษาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์และปริมาณของซิงก์สเตียเรทที่มีต่อค่าความหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จะให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.73 – 1.77 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิง [3, 26] โดยค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้เพราะ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.44 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ตารางที่ 4.1) ซึ่งมากกว่าผงแกรไฟต์ จึงส่งผลให้ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของผงแกรไฟต์ (ประมาณ 1 – 5 ส่วนต่อปริมาณเรซินร้อยส่วน) ดังนั้นค่าความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย รวมทั้งแม้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น ก็ส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตและปริมาณสารเติมแต่ง เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66

สำหรับชิ้นงาน แกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยซิงก์สเตียเรทจะให้ความหนาแน่นมีค่าประมาณ 1.73 – 1.74 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิง [3, 26] ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมซิงก์สเตียเรท เมื่อใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะและมีปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 ทั้งนี้เนื่องจากซิงก์สเตียเรทมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ตารางที่ 4.1) ซึ่งน้อยกว่าผงแกรไฟต์ รวมทั้งปริมาณซิงก์สเตียเรทที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของผงแกรไฟต์ (ประมาณ 1 – 5 ส่วนต่อปริมาณเรซินร้อยส่วน) ดังนั้นการเติมซิงก์สเตียเรทลงไปในส่วนผสมจึงส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต

4.4 การศึกษาการเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงในชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต

ในการศึกษาการเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงในชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต จะใช้กระบวนการที่ประยุกต์จากกระบวนการเวทเลย์ (Wet – lay) [20] ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้น้ำกลั่นเข้ามาเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสารช่วยยึดเกาะ รวมทั้งอาศัยสมบัติผงแกรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนที่สามารถดูดซับน้ำได้บางส่วน ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนโดยรวมลงในส่วนผสมของแกรไฟต์คอมโพสิตได้ แต่เดิมนั้นใช้กับสารช่วยยึดเกาะที่มีสถานะเป็นของแข็ง เช่น เส้นใยเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic fiber) แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้กับสารช่วยยึดเกาะที่มีสถานะเป็นของเหลว ผลจากการใช้วิธีที่ประยุกต์จากกระบวนการเวทเลย์ พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนโดยรวมในส่วนผสมของแกรไฟต์คอมโพสิตได้มากขึ้นจากเดิมที่ร้อยละ 66 มาเป็นร้อยละ 70 และร้อยละ 73 โดยน้ำหนัก (ซึ่งต่อไปนี้จะใช้คำว่า ส่วนผสมเวทเลย์ 70 และส่วนผสมเวทเลย์ 73 แทนส่วนผสมที่มีปริมาณคาร์บอนโดยรวมที่ร้อยละ 70 และ 73 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ)

ผลของการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องกดอัดด้วยความร้อนพบว่า ส่วนผสมเวทเลย์ 70 สามารถขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดการหลุดร่วง หรือการแตกหัก เมื่อนำไปทดสอบค่าการนำไฟฟ้าซึ่งเป็นสมบัติที่ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญเป็นลำดับแรก พบว่าชิ้นงานเวทเลย์ 70 ให้ค่าการนำไฟฟ้า 9.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร แต่เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่า ชิ้นงานเวทเลย์ 70 ให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากถึงร้อยละ 9.3 ซึ่งมีค่ามากกว่าที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนดอยู่มาก รวมถึงชิ้นงานหลังจากการทดสอบการดูดซึมน้ำ มีการบวมตัวและแตกหัก ส่งผลให้ส่วนผสมเวทเลย์ 70 ไม่มีความเหมาะสมที่นำไปพัฒนาเป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว เนื่องจากอาจทำให้เกิดภาวะน้ำท่วมเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากการดูดซับน้ำที่มากเกินไปของแผ่นนำกระแส ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอาจลดลงได้ ดังนั้นจึงเลือกที่จะไม่ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเวทเลย์ 70

สำหรับส่วนผสมเวทเลย์ 73 เมื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อนพบว่า สามารถขึ้นรูปได้ แต่ไม่มีความแข็งเพียงพอ และมีการหลุดร่วงตามบริเวณขอบของชิ้นงาน เมื่อสัมผัสจะพบผงของชิ้นงานหลุดร่วงออกมา อาจเนื่องมาจากปริมาณสารช่วยยึดเกาะที่อัตราส่วนนี้มีน้อยเกินไป และสารช่วยยึดเกาะบางส่วนอาจระเหยไปพร้อมกับน้ำในระหว่างขั้นตอนการอบแห้งเพื่อไล่ปริมาณน้ำในส่วนผสมออก จึงทำให้ผงแกรไฟต์ไม่สามารถยึดเกาะกันได้ ส่งผลให้ใช้ชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูปเกิดการหลุดร่วงและไม่สามารถนำชิ้นงานไปทดสอบหาสมบัติต่างๆได้

การจากศึกษางานของ Huang และคณะ [20] พบว่า นอกจากวิธีการขึ้นรูปส่วนผสมเวทเลย์ ซึ่งเรียกว่าเป็นการขึ้นรูปโดยตรงแล้ว ยังใช้วิธีการขึ้นรูปแบบเวท/ดาย – เลย์ โดยวิธีการนั้นจะคล้ายกับการขึ้นรูปโดยตรง แต่จะเติมอนุภาคแกรไฟต์ลงไปตรงกลางระหว่างส่วนผสมเวทเลย์คล้ายแซนด์วิช แล้วจึงนำไปขึ้นรูปตามปกติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้วิธีของ

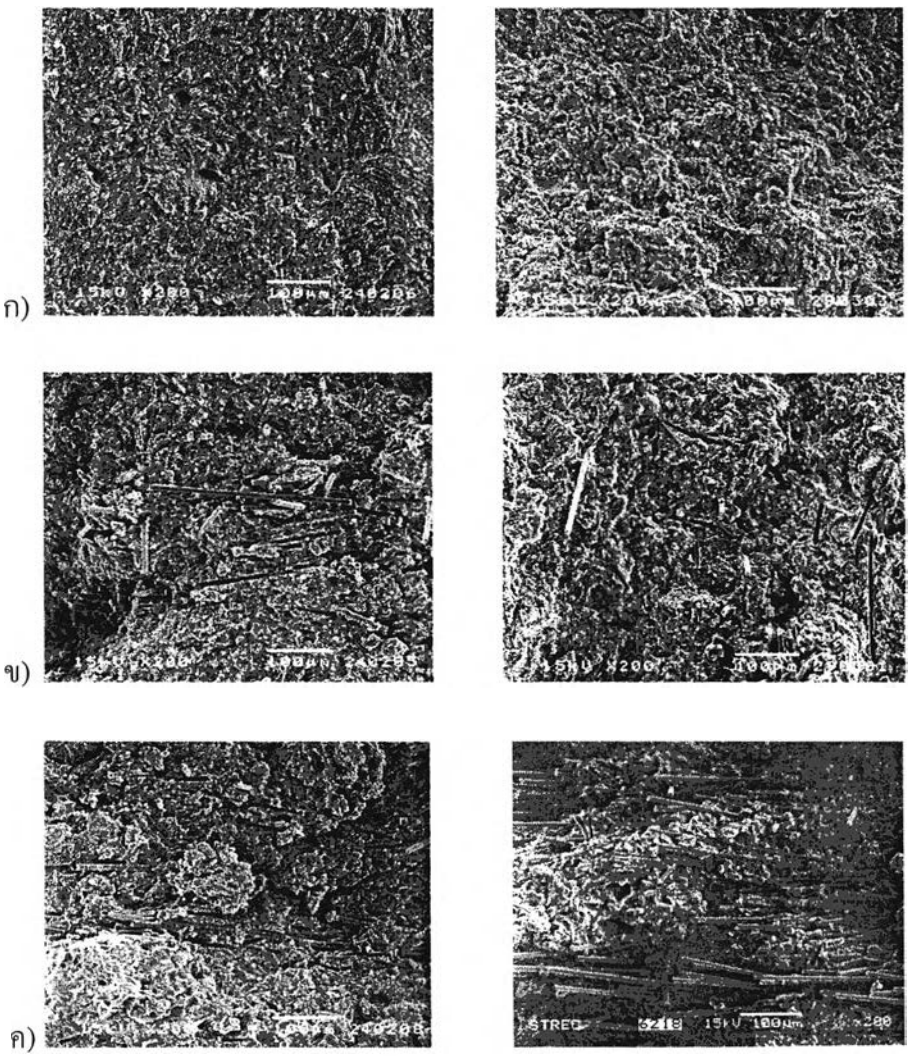
เวท/ดาย – เลย์ โดยจะเลือกส่วนผสมจากการศึกษาในส่วนที่ 4.2 ที่สามารถขึ้นรูปได้ และมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี มาผสมกับส่วนผสมเวทเลย์ในอัตราส่วน 4:1 ส่วนผสมที่เลือกมา ได้แก่ 1) ส่วนผสมที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารยึดเกาะ โดยมีผงแกรไฟต์ ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่อไปนี้จะแทนด้วย POE 66 2) ส่วนผสมที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารยึดเกาะ โดยมีผงแกรไฟต์ร้อยละ 58.7 โดยน้ำหนัก และเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 7.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่อไปนี้จะแทนด้วย 7.3CF และ 3) ส่วนผสมที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นสารยึดเกาะ โดยมีผงแกรไฟต์ร้อยละ 50.3 โดยน้ำหนัก และเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่อไปนี้จะแทนด้วย 15.7CF สำหรับส่วนผสมเวทเลย์นั้นจะเลือกส่วนผสมเวทเลย์ 73 เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้ยังพอจะสามารถขึ้นรูปได้และมีปริมาณเส้นใยคาร์บอนมากกว่าส่วนผสมเวทเลย์ 70 คาดว่าจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น นอกจากนี้ จากการศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์สเตียเรท ในหัวข้อที่ 4.3 พบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วง 1 - 2 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะเติมลงในส่วนผสม แต่เลือกที่จะเติมในปริมาณ 2 phr เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้น อาจทำให้เกิดการกระจายตัวในส่วนผสมได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยคาร์บอนในส่วนของการศึกษาผลของเส้นใยคาร์บอนต่อค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน (รูปที่ 4.11) พบว่า ส่วนผสมที่มีโดยมีผงแกรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 55.6 และ 10.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าของส่วนผสม 7.3CF (6.16 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) สามารถที่จะเป็นอีกสัดส่วนหนึ่งที่นำมาผสมกับผงเวทเลย์ได้ แต่เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีราคาแพง เมื่อใช้ในปริมาณมากย่อมส่งผลถึงต้นทุนการผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว ดังนั้นที่ค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกัน จึงเลือกส่วนผสมของ 7.3CF มาผสมกับผงเวทเลย์ เพื่อศึกษาสมบัติของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต

ส่วนผสมทั้งหมดนี้จะทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อนและศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

4.4.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

เมื่อนำชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 ไปศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22 จากรูป พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่มีส่วนผสมของผงเวทเลย์ 73 กับ POE66 7.3CF และ 15.7CF มีความหนาแน่นภายในโครงสร้างมากขึ้น ช่องว่างในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีจำนวนลดน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจาก ผงเวทเลย์ 73 มีขนาดเล็ก เมื่อนำไปผสมและขึ้นรูปจึงแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างและในรูพรุนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ทำให้เพิ่มความแน่นหนาภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์เมทริกซ์

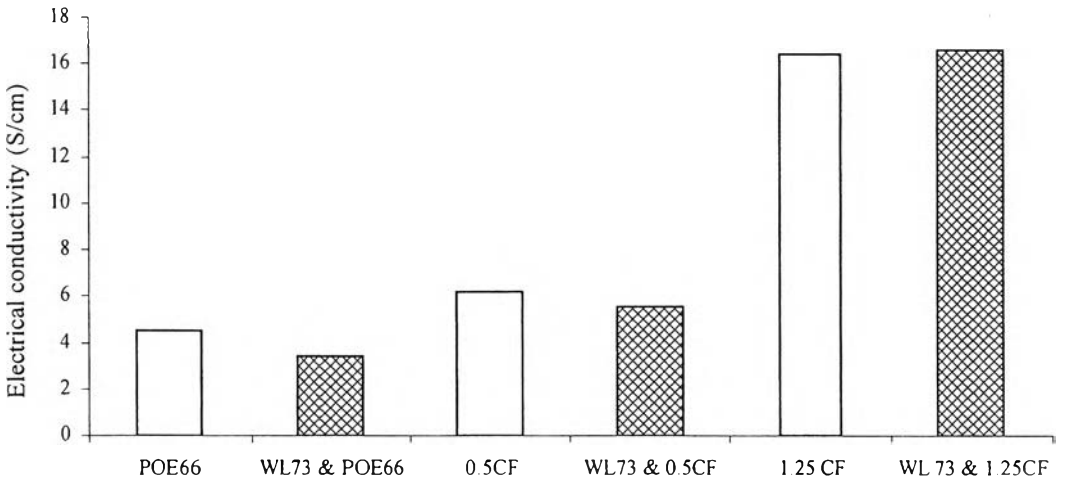


รูปที่ 4.22 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต เมื่อศึกษาผลของการเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73 ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ด้านซ้ายมือ) เปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนเติมผงเวทเลย์ (ด้านขวามือ) : ก) POE66 ข) 7.3CF และ ค) 15.7CF

4.4.2 สมบัติการนำไฟฟ้า

เมื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่า การผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 ไม่ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้า เมื่อเทียบกับชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติม โดยชิ้นงาน POE66 ที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 3.4 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ลดลงจากชิ้นงานที่ไม่ได้ผสม (4.52 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ชิ้นงาน 7.3CF ที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.58 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ลดลงจากชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมเล็กน้อย (6.17 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)

และชิ้นงาน 15.7CF ที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 16.57 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผสม (16.41 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)

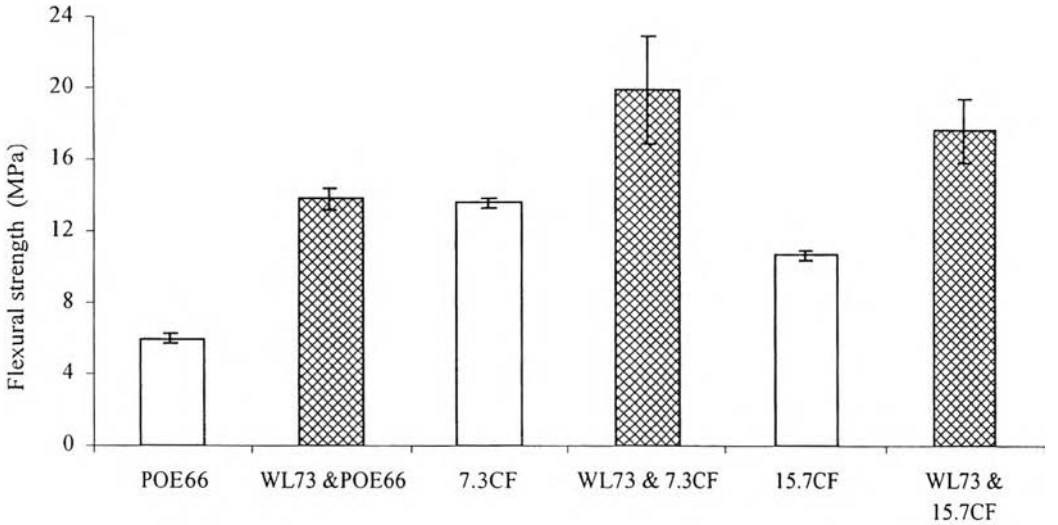


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบและการเติมส่วนผสมเวทเลย์73 ลงในชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73

4.4.3 สมบัติเชิงกล

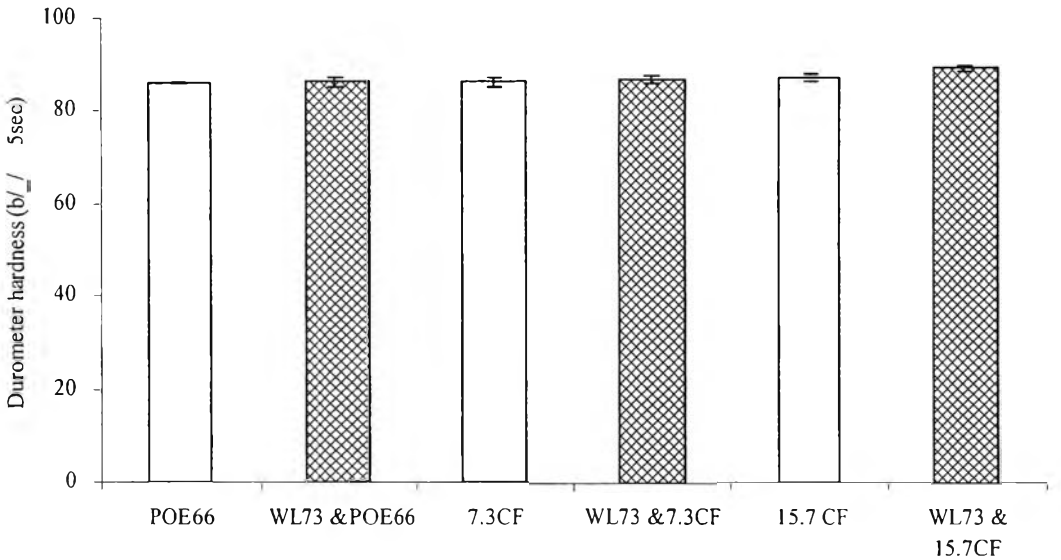
ค่าความแข็งแรงดัดและค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 แสดงดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.24 จะพบว่า การผสมผงเวทเลย์ 73 ส่งผลให้ความความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติม โดยชิ้นงาน POE66 7.5CF และ 15.7CF ที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 มีค่าความแข็งแรงดัดเท่ากับ 5.96 19.88 และ 17.58 เมกกะพาสคัล ตามลำดับ เปรียบเทียบกับส่วนผสมเดิมที่ยังไม่ได้ผสมผงเวทเลย์ 73 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40 จากค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานเดิม เนื่องจากผงเวทเลย์ที่เติมลงไปในส่วนผสมนั้นมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก สามารถแทรกตัวลงในช่องว่างที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานมีความแน่นหนามากขึ้น เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกสามารถกระจายแรงกดอัดได้ดีขึ้น เนื่องจากโครงสร้างมีความเสถียร ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดัดและการเติมส่วนผสมเวทเลย์73 ลงในชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73

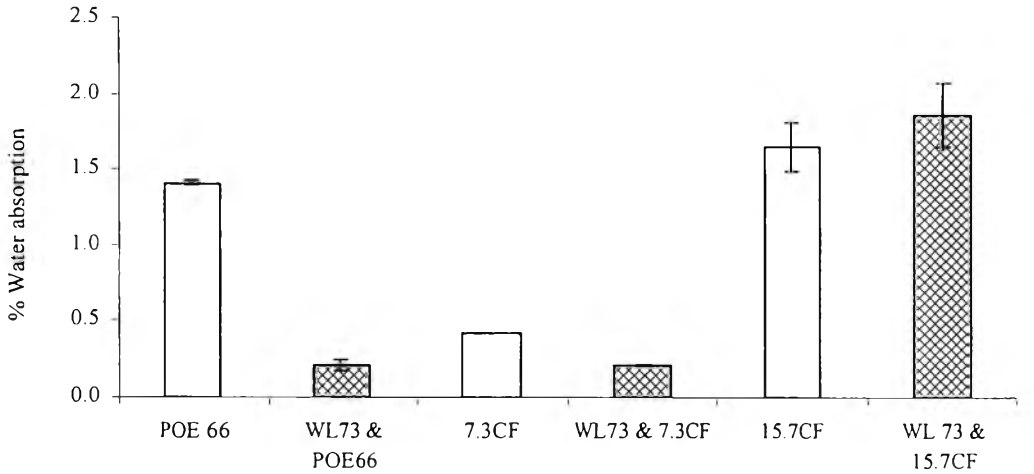
สำหรับค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบี จากรูปที่ 4.25 พบว่า การผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีน้อยมาก เมื่อเทียบกับชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติม โดยชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตทุกชิ้นงานที่ผสมผงเวทเลย์ 73 จะมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีอยู่ในช่วง B/86.4 – 89.3/5sec



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีและการเติมส่วนผสมเวทเลย์73 ลงในชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์ คอมโพสิตก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73

4.4.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

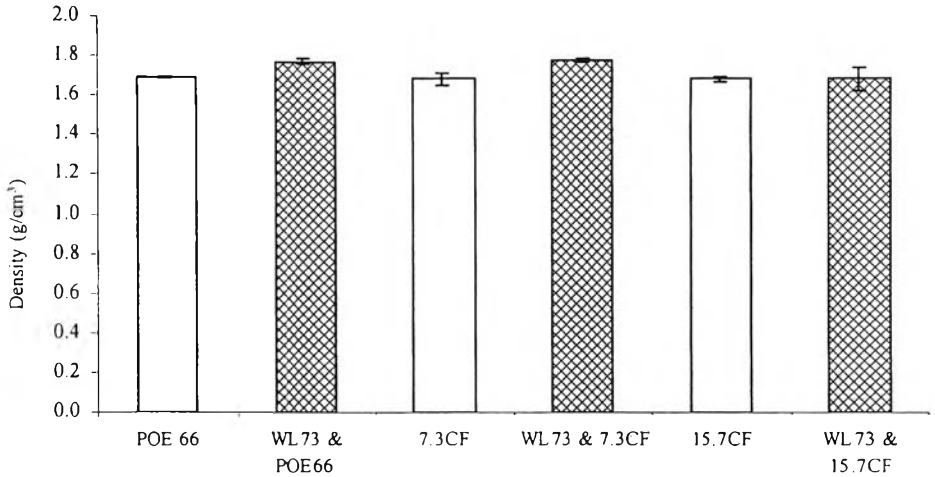
เมื่อศึกษาร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าชิ้นงาน POE66 และ 7.3CF ที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.21 ลดลงจากชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมผงเวทเลย์73 โดยชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ผสมผงเวทเลย์ทั้งสองชิ้นนี้ มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว [3, 26] การผสมผงเวทเลย์ 73 ช่วยลดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างพอลิเมอร์เมทริกซ์ ช่วยให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของพอลิเมอร์คอมโพสิต ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 จึงมีค่าลดลง ในขณะที่ชิ้นงาน 15.7CF ที่ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.86 เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากชิ้นงานที่ไม่ได้ผสม (ร้อยละ 1.65) และยังมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน การเติมผงเวทเลย์แม้จะสามารถเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างของโครงสร้างพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อขัดขวางการแทรกตัวของโมเลกุลน้ำ แต่พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน 15.7CF ที่ผสมผงเวทเลย์ยังมีค่าสูง เนื่องจากสัดส่วนของเส้นใยคาร์บอนในชิ้นงานนี้มีค่ามาก ซึ่งเส้นใยคาร์บอนมีส่วนความมีขั้วที่สามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำได้ ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน 15CF ที่ผสมผงเวทเลย์ 73 ยังคงมีค่าสูงอยู่



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซึมน้ำและการเติมส่วนผสมเวทเลย์73 ลงในชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73

4.4.5 ความหนาแน่น

การศึกษาผลของการเติมผงเวทเลย์ 73 ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตแสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า การผสมด้วยผงเวทเลย์ 73 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น โดยค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตทุกชิ้นงานที่ผสมผงเวทเลย์ 73 จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.76 – 1.77 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่ไม่ได้เติมเล็กน้อย ซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.68 – 1.69 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากผงเวทเลย์ 73 ที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์คอมโพสิต มีส่วนในการเพิ่มมวลของชิ้นงานให้มีมากขึ้น โครงสร้างมีความแน่นหนามากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณของส่วนผสมชิ้นงานเดิมต่อสัดส่วนของผงเวทเลย์ 73 (80:20 โดยน้ำหนัก) นั้น ผงเวทเลย์มีปริมาณน้อยกว่ามาก ดังนั้นแม้จะส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่เติมด้วยผงเวทเลย์ 73 มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ก็เพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย และมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและการเติมส่วนผสมเวทเลย์73 ลงในชิ้นงานต่างๆ เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตก่อนเติมส่วนผสมเวทเลย์ 73

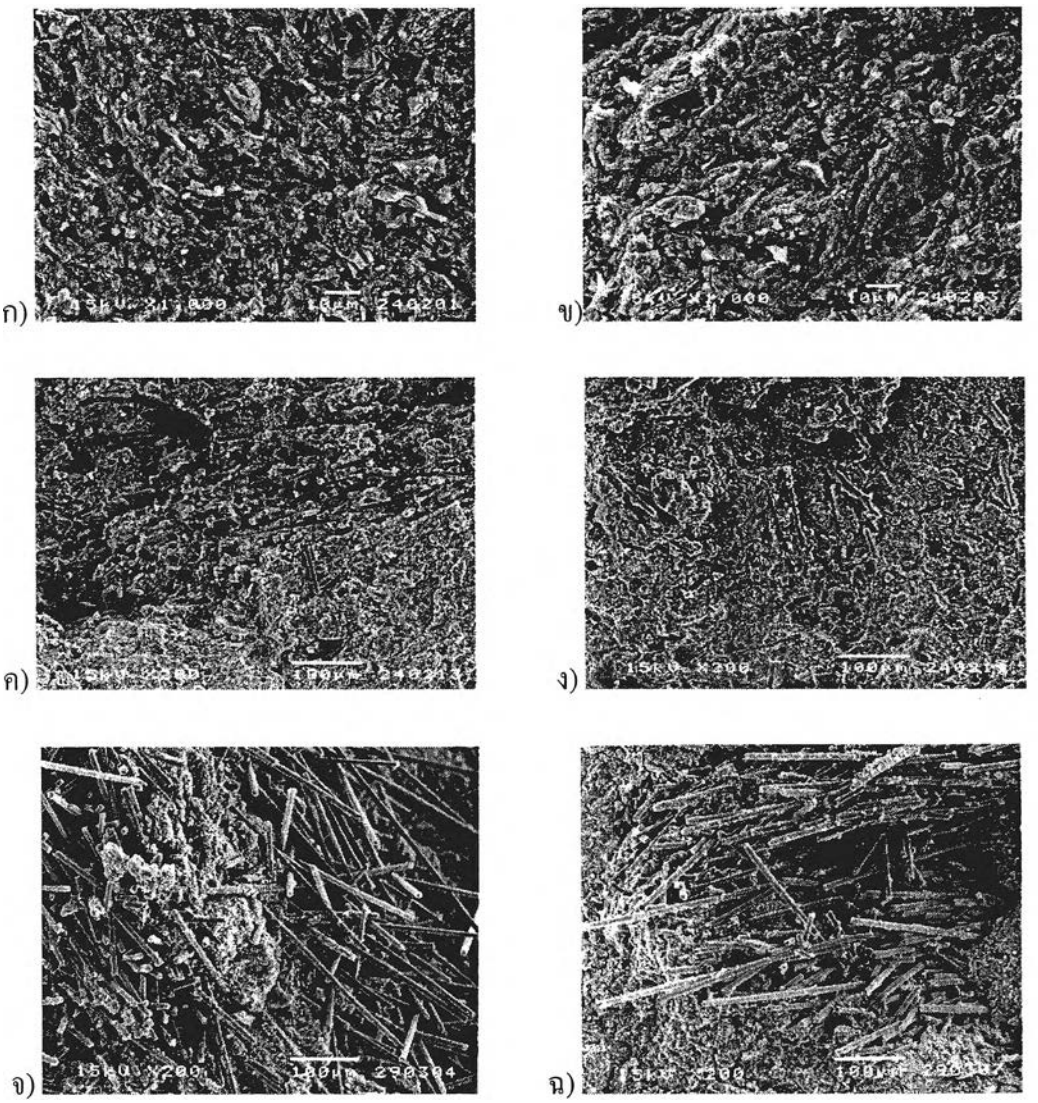
4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานคอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ

จากการศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะในหัวข้อที่ 4.2 พบว่า เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าการนำไฟฟ้าซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของแผ่นนำกระแสนั้น สารช่วยยึดเกาะที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปเพื่อเป็นแผ่นนำกระแส คือพอลิเอสเทอร์ แต่จากค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์นั้นยังไม่ผ่านเกณฑ์ค่าเป้าหมายของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 59 เมกกะพาสคัล [3] จึงเลือกศึกษาเรซินในกลุ่มพลาสติกเทอร์โมเซตเช่นเดียวกับพอลิเอสเทอร์ ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีราคาไม่สูงจนเกินไป จากการพิจารณาพบว่า อีพอกซีเรซิน มีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะสำหรับแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต

ในเบื้องต้นนั้น จะศึกษาที่ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้ กับแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะที่ปริมาณแกรไฟต์เท่ากัน จากนั้นจะศึกษาที่ปริมาณแกรไฟต์อิ่มตัว (จากการทดลองมีค่าเท่ากับร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละของเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 7.3 และ 15.7 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 2 phr ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากหัวข้อ 4.3

4.5.1 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ แสดงดังรูปที่ 4.28 จากการพิจารณาพื้นผิวของชิ้นงานที่ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 และ 75 โดยน้ำหนัก (รูป ก และ ข ตามลำดับ) พบว่า พื้นผิวชิ้นงานมีความเรียบ สม่ำเสมอ อีพอกซีเรซินสามารถรวมตัวกับผงแกรไฟต์ได้ดีและผงแกรไฟต์สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้โดยไม่พบการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อพิจารณาพื้นผิวของชิ้นงานที่ผสมเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 7.3 (รูป ค) พบว่า เส้นใยคาร์บอนมีการกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์อย่างไม่เป็นระเบียบ พื้นผิวของชิ้นงานที่ได้มีความเรียบ นอกจากนี้ที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 (รูป ง) พบว่า เส้นใยคาร์บอนเกิดการเรียงตัวในแนวที่ขนานกับภาคตัดขวางของชิ้นงาน การแทรกตัวของเส้นใยคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีความแน่นหนามากขึ้น เกิดความต่อเนื่องภายในโครงสร้างเนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีโอกาสสัมผัสกันได้มากขึ้น

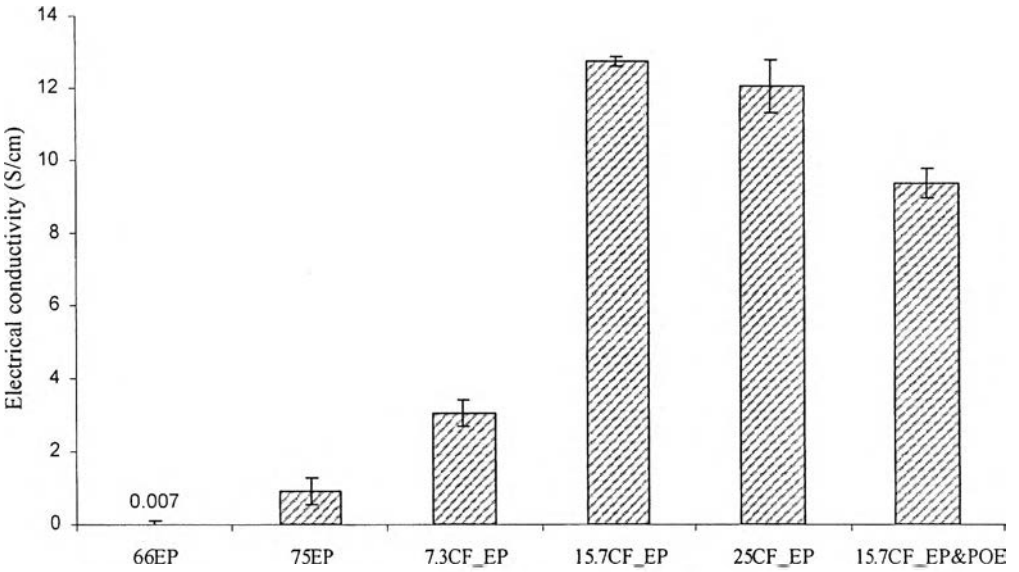


รูปที่ 4.28 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานคอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ: ก) และ ข) ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 และ 75 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ค) ง) และ จ) ปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 7.3 15.7 และ 25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 200 เท่า และ ฉ) ชิ้นงานคอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีและพอลิเอสเทอร์เป็นสารยึดเกาะ (อัตราส่วน 2:1) ปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 โดยน้ำหนัก ปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 200 เท่า

4.5.2 สมบัติการนำไฟฟ้า

การศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะแสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่า เมื่อปริมาณผงแกรไฟต์เพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuan และคณะ [17] โดยที่ผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนักจะมีค่าการนำไฟฟ้า 0.007 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และที่ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่อิ่มตัวของผงแกรไฟต์ในอีพอกซีเรซิน จะมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.92 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณผงแกรไฟต์เท่ากัน (ร้อยละ 66โดยน้ำหนัก) พบว่า ชิ้นงานที่ใช้อีพอกซีเรซินมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์มาก อาจเนื่องมาจาก ของผสมก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดนั้น ผงแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ถูกห่อหุ้มด้วยอีพอกซีเรซินในปริมาณมากเนื่องจากผงแกรไฟต์สามารถรวมตัวกับอีพอกซีเรซินได้ดีกว่าพอลิเอสเทอร์ (จากปริมาณอิ่มตัวของแกรไฟต์ในอีพอกซีเรซินซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ75) ทำให้เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแล้วผงแกรไฟต์อาจถูกห่อหุ้มหรือมีบางส่วนจมอยู่ในฟิล์มบางของอีพอกซีเรซินในปริมาณมาก [17] การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในของอะตอมของแกรไฟต์แต่ละอะตอมที่อยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดได้อย่างไม่ต่อเนื่อง สมบัติในการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้จึงลดลง แต่เมื่อปริมาณของผงแกรไฟต์เพิ่มขึ้น (ปริมาณของอีพอกซีเรซินน้อยลง) โอกาสที่ผงแกรไฟต์จะถูกห่อหุ้มด้วยฟิล์มบางของอีพอกซีเรซินมีน้อยลง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดได้ดีขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น

เมื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยคาร์บอน พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะเช่นเดียวกัน โดยชิ้นงานที่มีปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 12.73 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น จะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้า โดยชิ้นงานที่มีเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 25 (12.03 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) มีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่มีเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ ชิ้นงานที่ใช้สารช่วยยึดเกาะที่ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและพอลิเอสเทอร์เรซินในอัตราส่วน 2:1 และมีเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 นั้นมีค่าการนำไฟฟ้า (9.35 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมพอลิเอสเทอร์และมีปริมาณเส้นใยคาร์บอนเท่ากัน

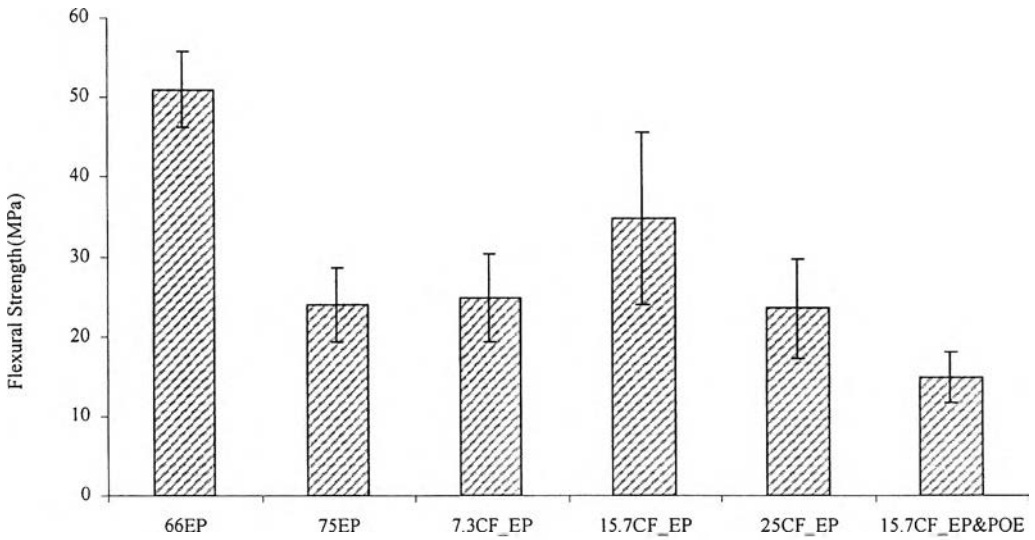


รูปที่ 4.29 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ

4.5.3 สมบัติเชิงกล

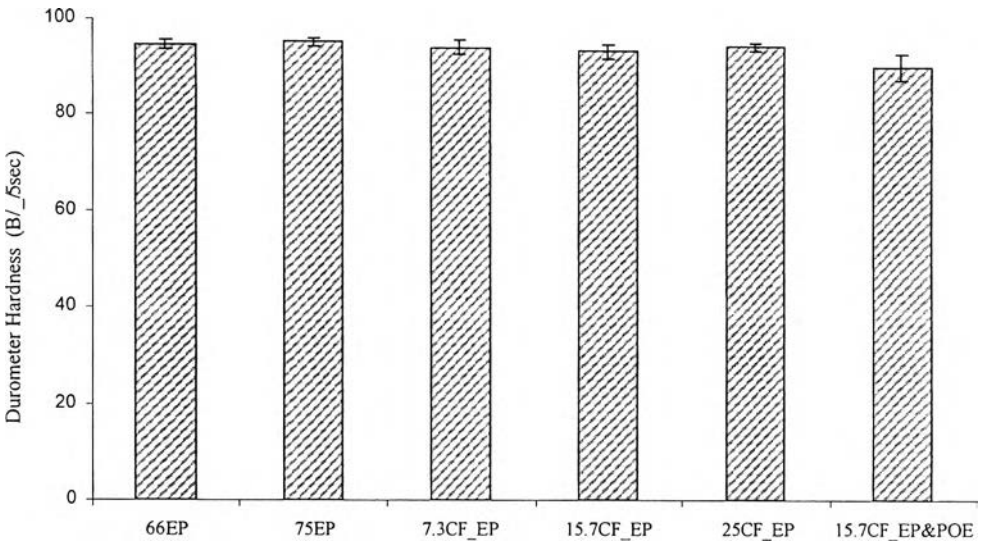
ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะแสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่า ที่ปริมาณผงแกรไฟต์เท่ากัน (ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก) ชิ้นงานที่ใช้อีพอกซีเรซินจะให้ค่าความแข็งแรงดัด (50.95 เมกกะพาสคัล) มากกว่าชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เรซิน และมีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว เมื่อปริมาณผงแกรไฟต์มากขึ้น ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานจะมีค่าลดลง และเมื่อผสมเส้นใยคาร์บอนลงในชิ้นงานที่ปริมาณคาร์บอนโดยรวมเท่ากับร้อยละ 75 พบว่า ค่าความแข็งแรงดัดมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณอีพอกซีเรซินที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงให้เกิดการยึดเกาะกันภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์เมทริกซ์มีปริมาณน้อยลง ความแข็งแรงของโครงสร้างภายในจึงลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดมีค่าลดลงจากชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนเป็นสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตามเพิ่มปริมาณเส้นใยคาร์บอนมากขึ้น (ร้อยละ25) จะเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มภายในโครงสร้างพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดเสถียรภาพภายในโครงสร้าง (รูปที่ 4.28 จ) ค่าความแข็งแรงดัดจึงลดลง ซึ่งผลที่ได้นี้ สอดคล้องกับผลของการใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะ นอกจากนี้ พบว่าการผสมพอลิเอสเทอร์เรซินลงในส่วนผสมของ 15.7CF_EP ทำให้ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจาก

สมบัติเชิงกลของพอลิเอสเทอร์ที่มีค่าความแข็งแรงดัดน้อยกว่าอีพอกซีเรซิน (ค่าความแข็งแรงดัดของอีพอกซีเรซินเท่ากับ 120 เมกกะพาสคัล) ทำให้เมื่อผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้แล้ว อาจทำให้สมบัติของเรซินผสมที่ได้มีค่าความแข็งแรงดัดลดลง ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานที่ได้จากเรซินผสมนี้จึงมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 4.30 ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ

จากการศึกษาค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตทุกชิ้นมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วง B / 94.1 – 95.2/ 5sec ยกเว้นชิ้นงานที่ผสมอีพอกซีเรซินและพอลิเอสเทอร์ (อัตราส่วน 2:1) จะให้ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ B / 89.9/ 5sec และที่ปริมาณผงแกรไฟต์เท่ากัน (ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก) ชิ้นงานที่ใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะจะมีค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีมากกว่าชิ้นงานที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารยึดเกาะ



รูปที่ 4.31 ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ชนิดบีของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ

4.5.4 ค่าการดูดซึมน้ำ

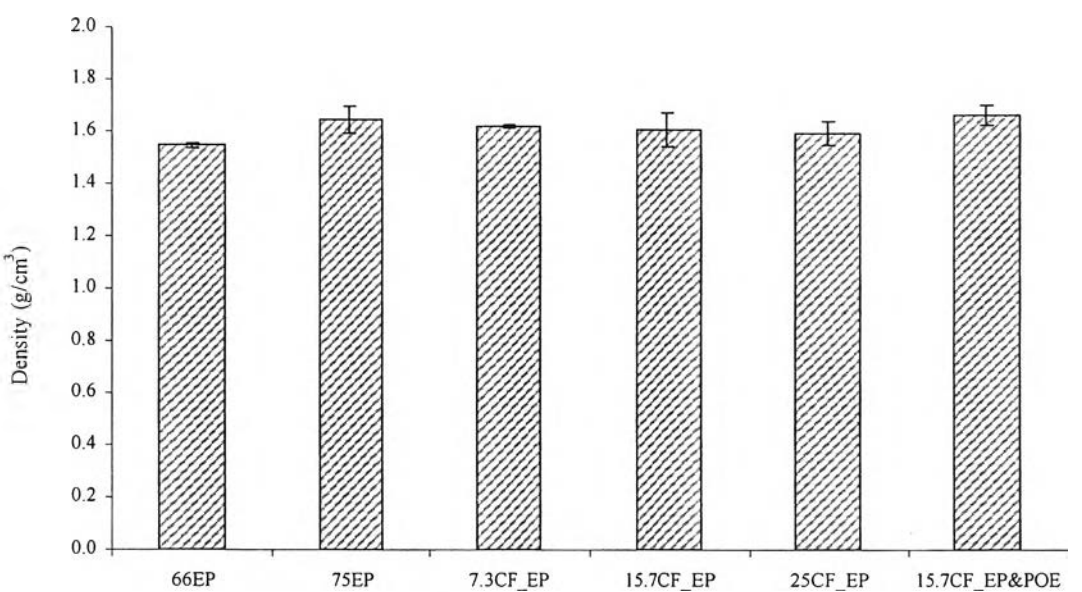
จากการศึกษาการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยคาร์บอนและผสมเส้นใยคาร์บอนในปริมาณน้อย (7.3 CF_EP)ไม่เกิดการดูดซึมน้ำในโครงสร้างของชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานที่ผสมเส้นใยคาร์บอนในปริมาณมาก และชิ้นงานที่ใช้สารยึดเกาะที่เป็นส่วนผสมของอีพอกซีเรซินและพอลิเอสเทอร์ จะมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 0.21 – 0. 27 ซึ่งเป็นค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ

	ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต					
	66EP	75EP	7.3CF_EP	15.7CF_EP	CF_EP	15.7CF_EP&PE
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	-	-	-	0.21	0.27	0.21

4.5.5 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะแสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่า ความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วง 1.55 – 1.66 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว ปริมาณผงแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย สำหรับปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนนั้นเพิ่มขึ้นจากเดิมในปริมาณน้อย (เพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 8 – 18) รวมทั้งมีความหนาแน่นต่ำ จึงไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงาน นอกจากนี้การใช้สารยึดเกาะที่ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและพอลิเอสเทอร์เรซิน ให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ใช้อีพอกซินเรซินเพียงชนิดเดียว ทั้งนี้เนื่องจากค่าความหนาแน่นของอีพอกซีเรซินและพอลิเอสเทอร์เรซินมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.32 ความหนาแน่นของชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ

4.6 การขึ้นรูปแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตเพื่อใช้เป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว

จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 จึงทำการรวบรวมสัดส่วนของแกรไฟต์คอมโพสิต โดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานเป็นหลัก แสดงดังตารางที่ 4.3 เพื่อพิจารณาหาสัดส่วนที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปและเซาะร่องเพื่อให้เกิดช่องทางการไหลของแก๊ส สำหรับใช้เป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว

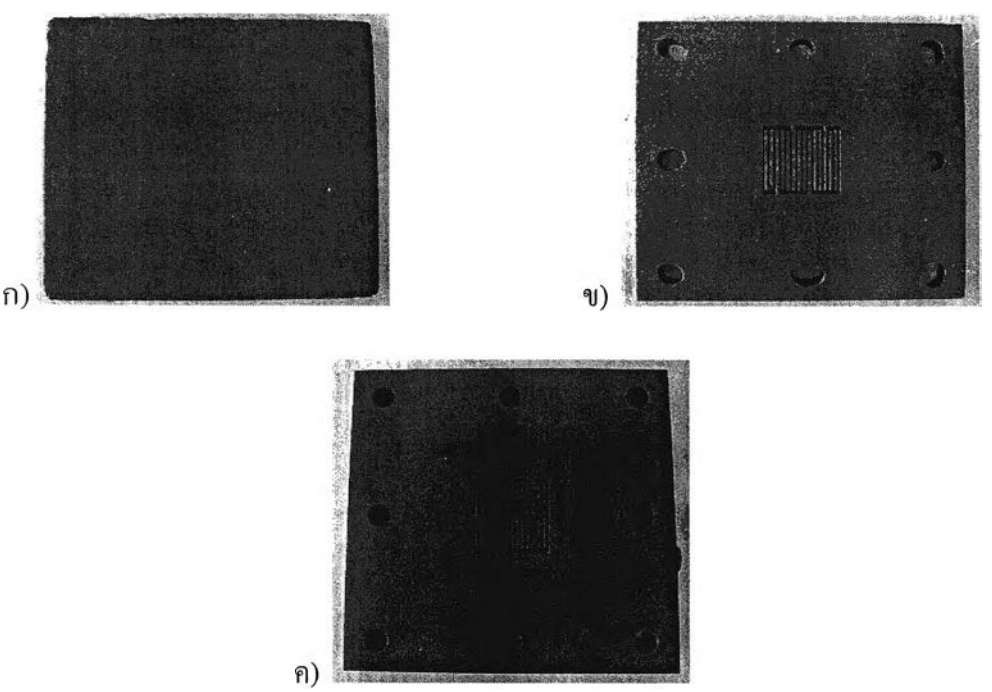
ตารางที่ 4.3 ชนิดและสมบัติของแกรไฟต์คอมโพสิตเพื่อพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

สมบัติของแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต	ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต					
	ผสมด้วยผงเวทเลย์ 73			ใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ		
	POE 66	7.3CF	15.7 CF	7.3 CF	15.7CF	25CF
ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)	3.4	5.58	16.57	3.04	12.73	12.03
ค่าความแข็งแรงดัด (MPa)	13.79	19.88	17.58	24.84	34.17	23.52
ค่าความแข็งดูโรมิเตอร์ (B/_/ 5sec)	86.4	86.8	89.3	94.1	93.1	94.2
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	0.21	0.21	1.86	-	0.21	0.27
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.77	1.77	1.68	1.62	1.60	1.60

จากตาราง พบว่า ชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิตที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปเพื่อทดสอบการทำงานจริงของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วคือ ชิ้นงาน 7.3CF ที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นสารช่วยยึดเกาะและผสมด้วยผงเวทเลย์73 (WL73&7.3CF) แม้ชิ้นงาน 15.7CF จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่ามาก แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานซึ่งมีค่าเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดอยู่มาก (น้อยกว่าร้อยละ 0.3) จึงเป็นสัดส่วนที่ไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากเมื่อขึ้นรูปและทดสอบการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว อาจทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเนื่องจากน้ำท่วมเซลล์ และทำให้ไม่สามารถทราบผลการทดลองที่แท้จริงได้ว่า ประสิทธิภาพที่ลดลงของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดเนื่องจากแผ่นนำกระแสหรือน้ำท่วมเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับชิ้นงานที่ใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะนั้น ชิ้นงานที่มีปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 15.7 ในปริมาณคาร์บอนโดยรวมร้อยละ 75 (15.7CF_EP) เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

ในการขึ้นรูปสำหรับการนำไปใช้งานจริงจะใช้แม่พิมพ์ขนาด กว้าง 11 เซนติเมตร ยาว 11 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร สำหรับชิ้นงาน WL 73&7.3CF นั้น ภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการกดอัด 5 ชั่วโมง และทำให้เย็นด้วยระบบหล่อเย็นหมุนเวียนเป็นเวลา 30 นาที และชิ้นงาน 15.7CF_EP จะใช้ภาวะ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการกดอัด 5 ชั่วโมง จะพบว่าเวลาในการกดอัดจะเพิ่มจาก 30 นาที เป็น 5 ชั่วโมง เนื่องจากแม่พิมพ์มีความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้ใช้เวลานานเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงรวมส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปเซาะร่องเพื่อให้เกิดช่องทางการไหลของแก๊ส โดยยึดรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สจากแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ ของ Electrochem, Inc.ดำเนินการเซาะร่องโดยบริษัทสุธียูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด

แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ยังไม่ได้ผ่านการเซาะร่อง แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ผ่านการเซาะร่อง และแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc.แสดงดังรูปที่ 4.33



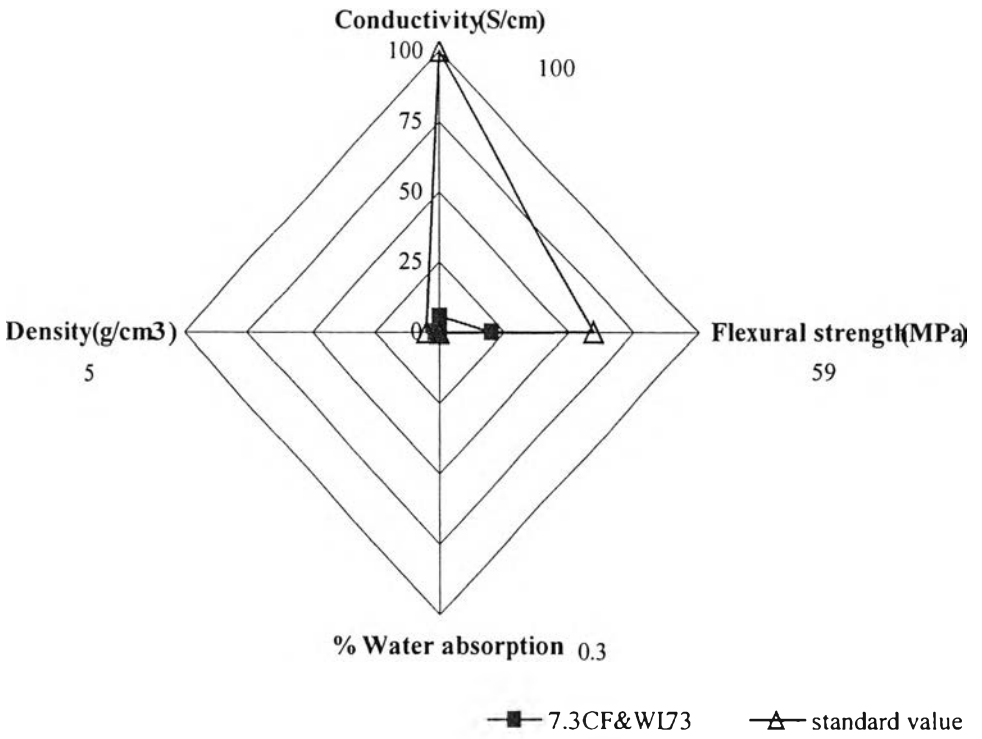
รูปที่ 4.33 แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้จากงานวิจัยและแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์: ก) แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต WL73& 7.3CF ที่ยังไม่ได้ผ่านการเซาะร่อง ข) แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต WL73& 7.3CF ที่ผ่านการเซาะร่อง ค) แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์จาก Electrochem Co. Ltd.

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.33 พบว่าชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต WL73& 7.3CF ที่ผ่านการเซาะร่องแล้ว สามารถให้ช่องทางการไหลของแก๊สที่ชัดเจน โดยช่องทางการไหลของแก๊สที่ทำการเซาะร่องมีรูปแบบเป็น Serpentine และเมื่อทดสอบการรั่วไหลของแก๊สโดยให้แก๊สไนโตรเจนเคลื่อนที่ผ่านช่องทางการไหลภายในแผ่นนำกระแส พบว่าแก๊สไนโตรเจนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้โดยไม่เกิดการรั่วซึม

สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานแกรไฟต์คอมโพสิต 15.7CF_EP นั้น พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่มีความหนา 1 เซนติเมตรได้ แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้มีผิวหน้าบริเวณใกล้กับขอบของชิ้นงานที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ไม่สามารถนำไปเซาะร่องเพื่อทดสอบการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงได้ เนื่องจากในขั้นตอนของการขึ้นรูปเป็นแผ่นนั้นไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงของสารช่วยยึดเกาะ (อีพอกซีเรซินในงานวิจัยสามารถเกิดการเชื่อมโยงของโครงข่ายพอลิเมอร์ได้ที่อุณหภูมิห้อง) การขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้อีพอกซีเรซินนี้ ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเป็นแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตคือ ความดันจากเครื่องอัดแบบขึ้นรูปและระยะเวลาในการเชื่อมโยงของโครงข่ายพอลิเมอร์ ส่วนอุณหภูมิและระยะเวลาในการกดอัดจะไม่ส่งผลต่อการขึ้นรูป ซึ่งระยะเวลาที่เกิดการเชื่อมโยงของโครงข่ายพอลิเมอร์จะเป็นผลมาจากสัดส่วนของปริมาณเรซินและสารช่วยให้แข็งตัว (Hardener) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงสำหรับอัตราส่วนเรซินต่อสารช่วยให้แข็งตัวเท่ากับ 2:1 วัตถุดิบสำหรับแม่พิมพ์ความหนา 3 มิลลิเมตรและแม่พิมพ์ความหนา 1 เซนติเมตรจะใช้สัดส่วนของเรซินและสารช่วยให้แข็งตัวที่ 2:1 เท่ากันทำให้มีเวลาสำหรับการเกิดการเชื่อมโยงเท่ากัน แต่แม่พิมพ์หนา 1 เซนติเมตรต้องใช้ปริมาณวัตถุดิบมากกว่า ในขณะที่เวลาสำหรับการเชื่อมโยงเท่าเดิม จึงทำให้การรับแรงอัดพร้อมกับเกิดการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ เกิดได้ไม่ทั่วถึงภายในแม่พิมพ์ ส่งผลให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันภายในชิ้นงาน

การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย(แผ่นคอมโพสิต 7.3CF&WL73) กับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว (รูปที่ 4.34) พบว่าค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงดัดของแผ่นคอมโพสิตที่ได้ยังมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน กล่าวคือยังมีค่าน้อยกว่า 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตรและ 59 เมกกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งต้องมีการปรับปรุงสมบัติทั้งสองนี้ต่อไป สำหรับค่าร้อยละการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นนั้น มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือน้อยกว่าร้อยละ 0.3 และน้อยกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัยกับแผ่นโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากงานวิจัยของเอื้องดาว [21] และ Cho และคณะ [26] แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดัดยังมีค่าต่ำกว่าแผ่นคอมโพสิตที่ได้จากงานวิจัยของเอื้องดาวและ Cho นอกจากนี้ทั้งค่าการดูดซึมน้ำและค่าความหนาแน่นของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าผ่านเกณฑ์ค่าเป้าหมายเช่นเดียวกับงานวิจัยของเอื้องดาวและ Cho



รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย (7.3CF&WL73) กับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว

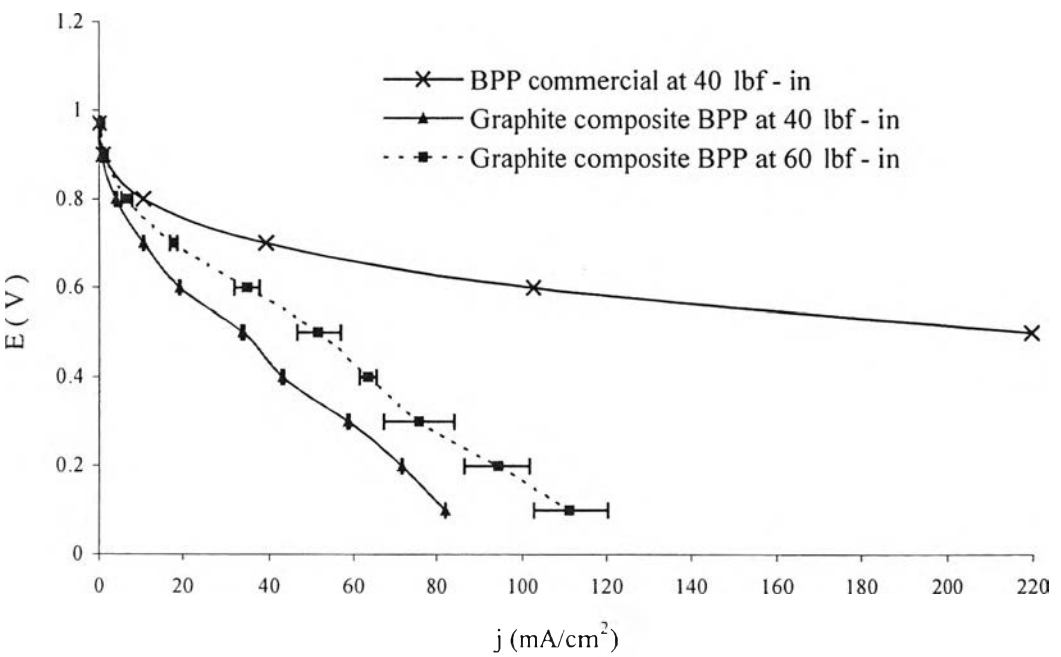
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้จากงานวิจัย (7.3CF&WL73) กับแผ่นพอลิเมอร์คอมโพสิตจากงานวิจัยของเอื้องดาว และ Cho และคณะ

สมบัติ	แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต (7.3CF&WL73)	แผ่นพอลิเมอร์คอมโพสิต (40 AB + 10CF) ของเอื้องดาว [21]	แผ่นพอลิเมอร์คอมโพสิต ของ Cho และคณะ [26]	
			คอมโพสิตเอ	คอมโพสิตบี
ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)	5.58	3.692 – 5.006	0.008	0.007
ค่าความแข็งแรงดัด (MPa)	19.88	46.85 – 49.76	39.4	20.9
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	0.21	0.016 – 0.021	0.133	0.287
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.77	1.16 – 1.21	1.69	1.82

4.7 การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์คอมโพสิตจากงานวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเมื่อใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม จะทดสอบโดยประกอบเป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตที่ได้จากการวิจัย 1 แผ่น ประกบเข้ากับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ชนิดแผ่นแกรไฟต์ 1 แผ่น และหน่วยประกอบเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc.เปรียบเทียบผลกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวของ Electrochem, Inc. โดยแสดงผลเป็นกราฟโพลาไรเซชัน และ Nyquist plot ดังรูปที่ 4.35 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ

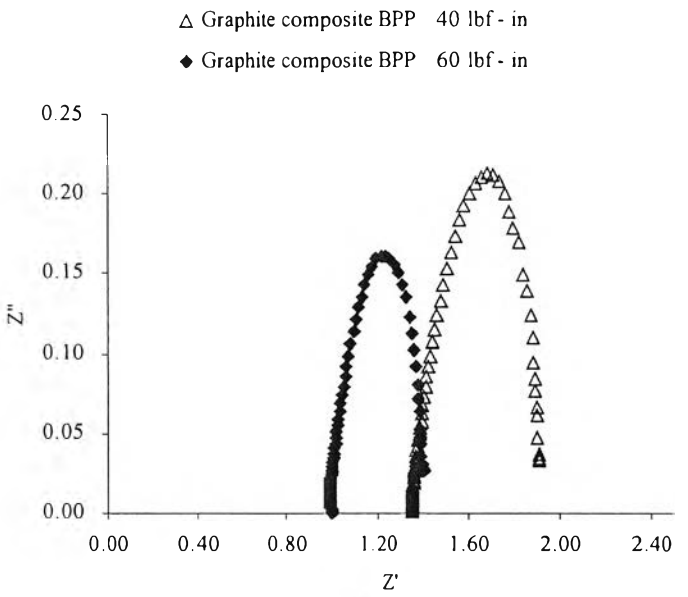
จากรูปที่ 4.35 พบว่า ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตจากงานวิจัย จะให้ค่าความหนาแน่นกระแส (19.23 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเชิงพาณิชย์ (102 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์และโมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์ 40 ปอนด์แรง – นิ้ว ทั้งนี้เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่า 100 ซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร [29] ซึ่งมากกว่าแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสเชิงพาณิชย์เกิดขึ้นได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้มีค่ามากกว่า



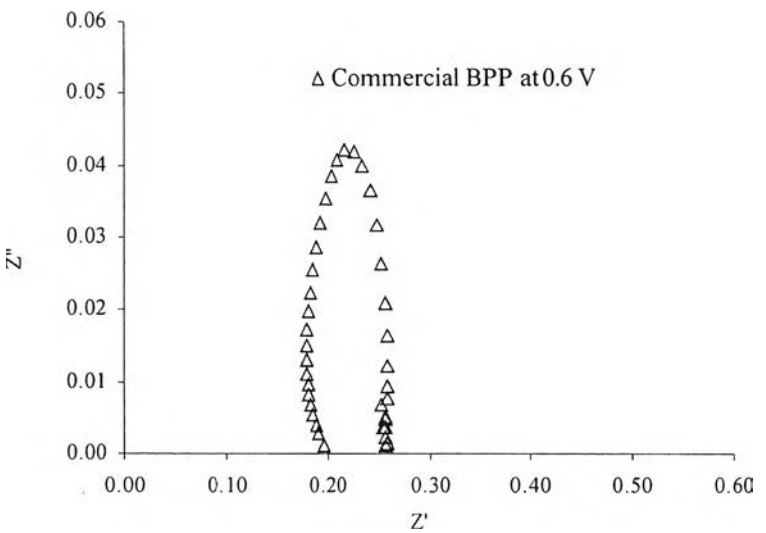
รูปที่ 4.35 กราฟโพลาไรเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้งานวิจัยเปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc.

ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก Nyquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัยและแผ่นเชิงพาณิชย์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ จะพิจารณาจากค่าความต้านทานโอห์มมิก (Ohmic resistance) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแส การเคลื่อนที่ของไอออนผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ และความต้านทานสัมผัส (Contact resistance) [2] ซึ่งจาก Nyquist plot ความต้านทานโอห์มมิกจะอยู่ในช่วงเริ่มต้นของแกน X (ค่า x = 0) จนถึงจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟ ผลการทดสอบพบว่า ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตจากงานวิจัยจะให้ค่าความต้านทานโอห์มมิก (1.36 โอห์ม, รูปที่ 4.36) มากกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเชิงพาณิชย์ (0.19 โอห์ม, รูปที่ 4.37) ที่โมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์เท่ากับ 40 ปอนด์แรง – นิ้ว ซึ่งค่าความต้านทานโอห์มมิกโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันนี้ เป็นผลเนื่องจาก ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วและความต้านทานสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ทดสอบใช้หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดเชิงพาณิชย์ชิ้นเดียวกัน ดังนั้น แสดงว่าประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัยยังคงมีค่าน้อยกว่าแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ ทำให้ค่าความต้านทานโอห์มมิกมีค่ามากกว่า ทั้งนี้สอดคล้องกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าของแผ่นคอมโพสิตซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าค่าของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc. (219.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสภาพหลังการใช้งานของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย ไม่พบการบวมตัว หรือการบุบสลายของแผ่นนำกระแส

เพื่อเป็นการลดผลของความต้านทานสัมผัส จึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้แผ่นนำกระแสที่ได้จากงานวิจัยโดยเพิ่มค่าโมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์เป็นที่ 60 ปอนด์แรง – นิ้ว ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่า เซลล์สามารถให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ (34 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, รูปที่ 4.35) เพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานโอห์มมิกที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 (0.99 โอห์ม, รูปที่ 4.36) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการใช้โมเมนต์การหมุน 40 ปอนด์แรง - นิ้ว เนื่องจากการเพิ่มค่าโมเมนต์การหมุนคือการเพิ่มแรงอัดในการประกอบชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ทำให้ลดค่าความต้านทานสัมผัส (Contact resistance) ที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นนำกระแสและขั้วไฟฟ้า ทำให้การเคลื่อนที่และการส่งผ่านอิเล็กตรอนดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความต้านทานโอห์มมิกลดลง



รูปที่ 4.36 Nyquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วที่ได้จากงานวิจัย ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ที่ค่าโมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์ต่างๆ



รูปที่ 4.37 Nyquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc. ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ และใช้โมเมนต์การหมุนประกอบเซลล์ 40 ปอนด์แรง – นิ้ว