

บทที่ 4

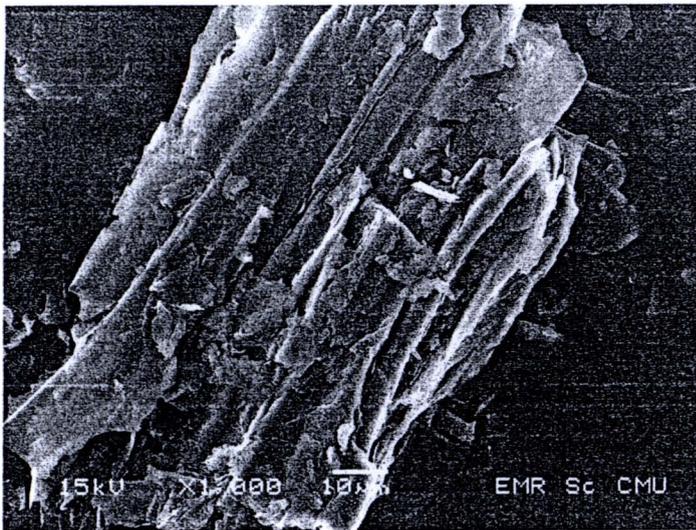
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเสริมแรงฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นไบโพลาร์เพลต ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้า ได้แก่ แกรไฟต์ และผงเขม่าดำ และสารเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยมียางไนไตรล์ช่วยลดความเปราะของวัสดุคอมโพสิต ทั้งนี้ศึกษาที่อัตราส่วนต่างๆโดยน้ำหนัก และศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์ สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

4.1 การศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์

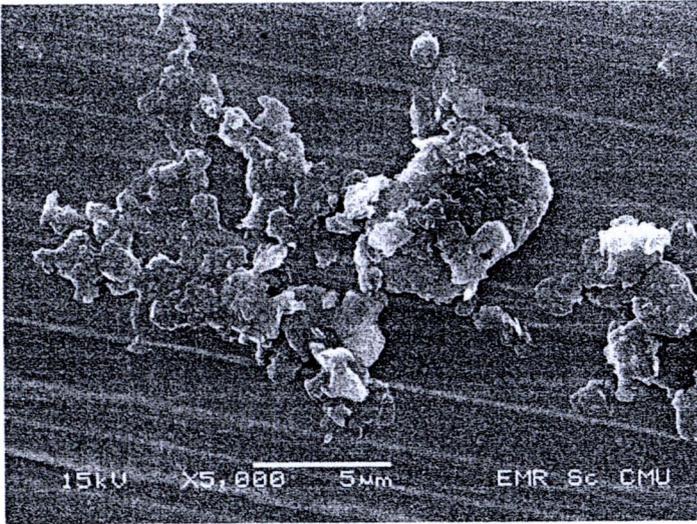
4.1.1. ลักษณะของสารตัวเติมนำไฟฟ้า

ทำการศึกษาลักษณะของสารตัวเติมนำไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสารตัวเติมนำไฟฟ้ามีลักษณะดังรูป 4.1-4.3 สำหรับแกรไฟต์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และผงเขม่าดำที่กำลังขยาย 5,000 - 15,000 เท่า ตามลำดับ



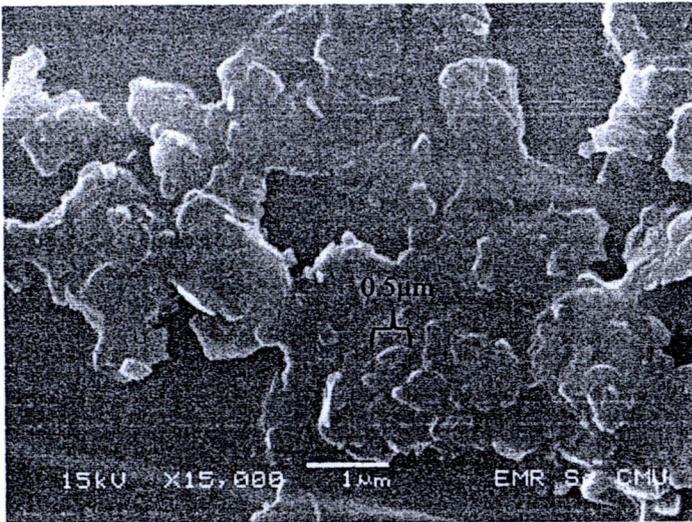
รูป 4.1 ลักษณะของอนุภาคแกรไฟต์ กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ลักษณะของแกรไฟต์จะเป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนกัน)



รูป 4.2 ลักษณะของผงเขม่าดำ กำลังขยาย 5,000 เท่า

(มีลักษณะคล้าย เกี๊ยวเล็กๆ รวมกันเป็นกลุ่มก้อน)



รูป 4.3 ลักษณะของผงเขม่าดำ กำลังขยาย 15,000 เท่า

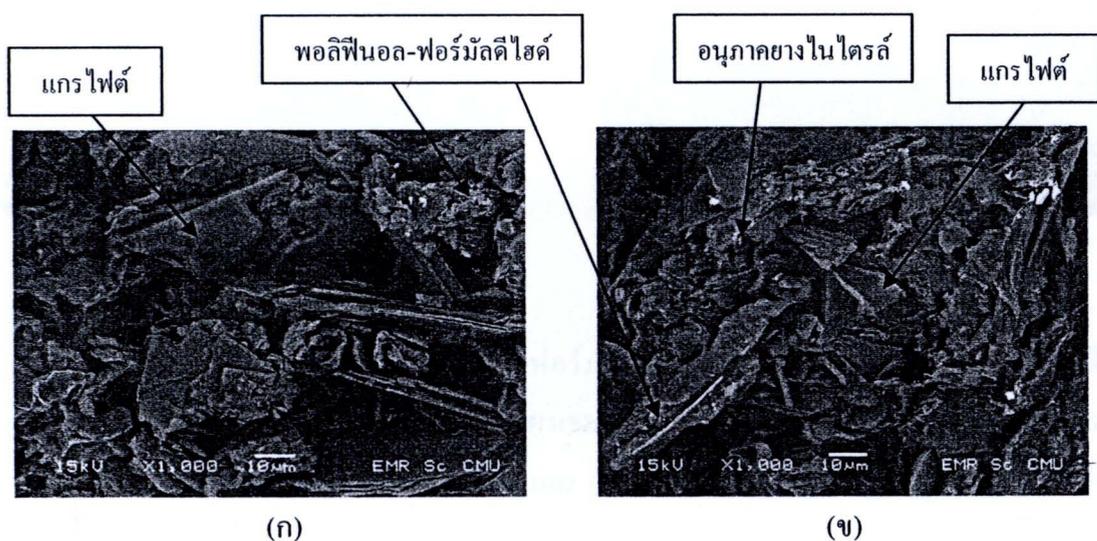
(เมื่อทำการเพิ่มกำลังขยายจะสังเกตเห็นเกี๊ยวเล็กๆ จำนวนมากขนาดประมาณ 0.5 ไมโครเมตร)

4.1.2. ลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมของการกระจายตัวของสารตัวเติมนำไฟฟ้าในฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต โดยศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าชนิดเดียวและที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรง

4.1.2.1 ลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าชนิดเดียว

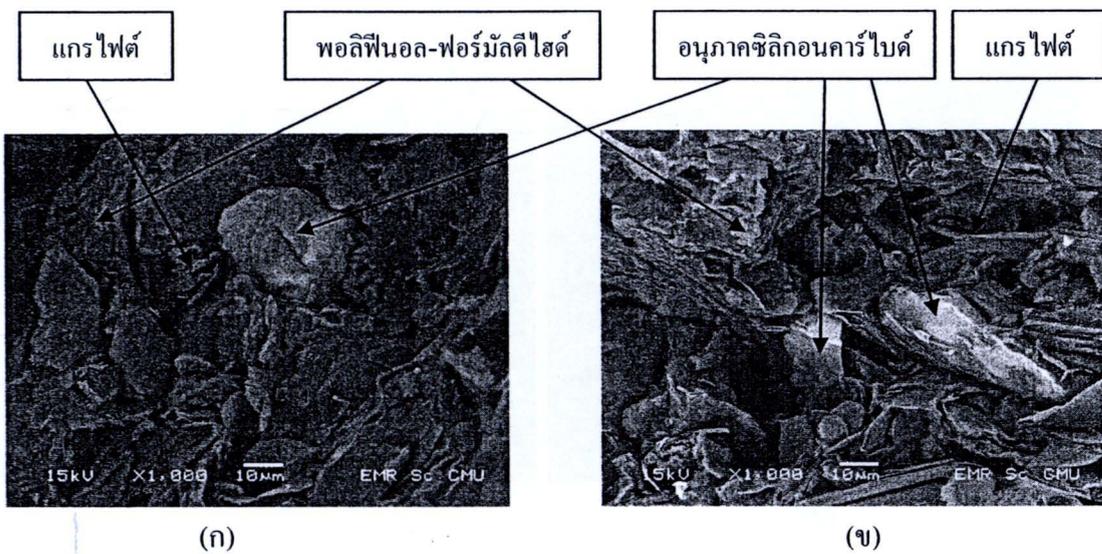
การศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าชนิดเดียว คือ ที่ปริมาณแกรไฟต์ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (โดยมีอนุภาคยางไนไตรล์ร่วมด้วย) โดยเปรียบเทียบคอมโพสิตทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่ม พบว่า การทำการอบหลังบ่มทำให้เกิดการเชื่อมโยงของอนุภาคต่างๆ ที่เรียงชิดกันมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการอบหลังบ่มทำให้ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เกิดปฏิกิริยาการเชื่อม โครงร่างตาข่าย ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น การหดตัวของเมทริกซ์จะสูงขึ้น ทำให้แกรไฟต์ที่เมทริกซ์ห่อหุ้มไว้ถูกกระชับให้อยู่ใกล้กัน



รูป 4.4 ลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) ไม่ผ่านการอบหลังบ่ม และ (ข) ทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

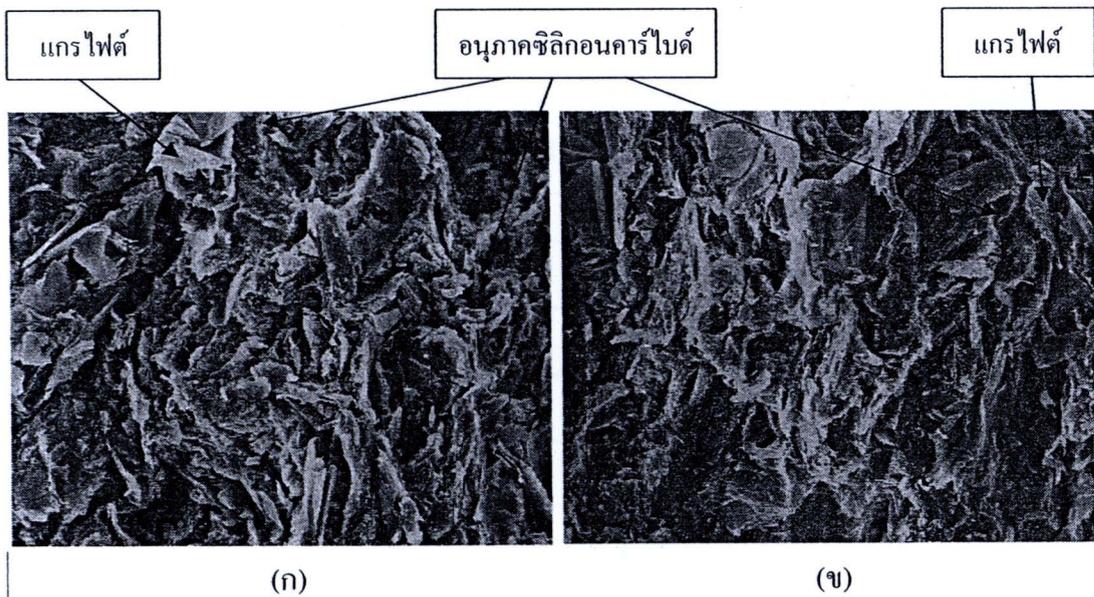
4.1.2.2 ลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟิล์มอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงและเมื่อทำการเพิ่มปริมาณและความดัน

การศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟิล์มอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าและสารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วม (ผงเขม่าดำ) กับสารเสริมแรง (ซิลิกอนคาร์ไบด์) โดยเปรียบเทียบคอมโพสิตทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่ม พบว่า การทำการอบหลังบ่มทำให้เกิดการเชื่อมโยงของอนุภาคที่เรียงชิดกันมากขึ้น และสามารถสังเกตเห็นอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่แทรกตัวอยู่ในคอมโพสิต แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งของผงเขม่าดำได้ เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็ก อาจจะแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคของแกรไฟต์กับอนุภาคอื่นๆ ที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า



รูป 4.5 ลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟิล์มอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้า (G79CB1SiC1) คือ แกรไฟต์ ร่วมกับ ผงเขม่าดำและอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) ไม่ผ่านการอบหลังบ่ม และ (ข) ทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

การศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของพินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้า [G79CB1SiC1 (70g, P)] คือ แกรไฟต์ ร่วมกับ ผงเขม่าดำ และอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของคอมโพสิต จาก 60 กรัม เพิ่มขึ้นเป็น 70 กรัม และเปลี่ยนแปลงความดันจากเดิม 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพิ่มขึ้นเป็น 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่า คอมโพสิตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เกิดการเชื่อมโยงของอนุภาคแกรไฟต์ที่เรียงชิดกันมากขึ้น อนุภาคของผงเขม่าดำ และซิลิกอนคาร์ไบด์แทรกตัวในคอมโพสิต ทำให้ไม่สามารถเห็นลักษณะของอนุภาคได้ชัดเจน จากการวิเคราะห์พลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในอะตอม (EDS) สามารถระบุตำแหน่งอนุภาคต่าง ๆ อย่างคร่าว ๆ ดังรูป 4.6



รูป 4.6 ลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของพินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้า [G79CB1SiC1 (70g, P)] คือ แกรไฟต์ ร่วมกับ ผงเขม่าดำและอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของคอมโพสิต จาก 60 กรัม เพิ่มขึ้นเป็น 70 กรัมและเปลี่ยนแปลงความดันจากเดิม 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพิ่มขึ้นเป็น 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) ไม่ผ่านการอบหลังบ่ม และ (ข) ทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

4.2 ความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต

สำหรับการนำฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต ไปผลิตเป็นไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน นอกจากจะพิจารณาสมบัติด้านการนำไฟฟ้าแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงความหนาแน่นซึ่งจะบ่งบอกถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อสามารถผลิตเซลล์เชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักน้อย เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะนำไปประยุกต์ในงานเกี่ยวกับยานพาหนะ ถ้าเซลล์เชื้อเพลิงมีน้ำหนักมากเกินไปจะทำให้การนำไปใช้ไม่แพร่หลายเท่าที่ควร จึงได้มีการกำหนดให้ค่าความหนาแน่นมาตรฐานของไบโพลาร์เพลต (DOE) ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งค่าความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ สารตัวเติมนำไฟฟ้า และสารตัวเติมเสริมแรง รวมไปถึงค่าความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตแสดงดังตาราง 4.1 และ 4.2

ตาราง 4.1 ค่าความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ สารตัวเติมนำไฟฟ้า และสารตัวเติมเสริมแรง

พอลิเมอร์/สารตัวเติมนำไฟฟ้า/ สารตัวเติมเสริมแรง	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)
ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์	1.252 (จากการทดลอง)
แกรไฟต์ (KS150)	2.08-2.30 [26]
ผงเขม่าดำ	0.34 [46]
ซิลิกอนคาร์ไบด์	3.21 (จากการทดลอง)
ยางไนไตรล์	1.06 (จากการทดลอง)
ซิงค์สเตียเรต	1.095 [53]

จากกฎของสารผสม (rule of mixture) [8] ความหนาแน่นของคอมโพสิตสามารถคำนวณได้จากค่าความหนาแน่นขององค์ประกอบและสัดส่วนขององค์ประกอบนั้น ๆ โดยที่

$$\begin{aligned}\rho_{\text{composite}} &= (\rho_{\text{novolac}} \times \text{weight fraction}) + (\rho_{\text{graphite}} \times \text{weight fraction}) \\ &= (1.2521 \times 0.2) + (2.08 \times 0.8) \\ &= 1.9144 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{composite}} &= (\rho_{\text{novolac}} \times \text{weight fraction}) + (\rho_{\text{graphite}} \times \text{weight fraction}) \\ &= (1.2521 \times 0.2) + (2.30 \times 0.8) \\ &= 2.0902 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

ทั้งนี้ความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่มีเกรไฟต์ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่วัดโดยชั่งวัดความหนาแน่นต่ำกว่าค่าที่ประมาณเอาไว้ซึ่งอยู่ระหว่าง 1.9144 - 2.0902 g/cm³ น่าจะเนื่องมาจากโพรงอากาศภายในชิ้นงาน ทั้งนี้สังเกตได้จากขณะขึ้นรูปชิ้นงาน แผ่นคอมโพสิตที่ได้จะไม่แน่น (dense) เท่ากับกรณีเดิมยางเข้าร่วมด้วย

ตาราง 4.2 ค่าความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมเสริมแรงและที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรง ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่ม

Polymer Composite	Density (g/cm ³) (pre-post cure)	Density (g/cm ³) (post cure 190°C 30 hr)
SiC0	1.252 ± 0.0558	-
SiC2	1.278 ± 0.1671	-
SiC4	1.304 ± 0.3507	-
SiC6	1.359 ± 0.2086	-
SiC8	1.467 ± 0.2451	-
SiC10	1.491 ± 0.1289	-
G80	1.552 ± 0.1405	1.482 ± 0.0236
G80N5	1.765 ± 0.0916	1.723 ± 0.0582
G79N5SiC1	1.797 ± 0.2093	1.753 ± 0.0134
G78N5SiC2	1.888 ± 0.1517	1.821 ± 0.0852
G76N5SiC4	1.890 ± 0.0819	1.745 ± 0.0043
G74N5SiC6	1.923 ± 0.0195	1.844 ± 0.0095
G72N5SiC8	2.022 ± 0.0112	1.969 ± 0.0123
G75N5CB5	1.568 ± 0.0625	1.493 ± 0.0087
G79N5CB1	1.728 ± 0.1743	1.605 ± 0.0193
G79N5CB1SiC1	1.784 ± 0.0181	1.621 ± 0.0442
G79N5CB1SiC1(70g)	2.681 ± 0.2532	2.497 ± 0.0716

จากตารางค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตที่เพิ่มซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และการอบหลังบ่มเมื่อพิจารณา error bar แล้ว ผลของความหนาแน่นของคอมโพสิตทั้งก่อนและหลังการอบหลังบ่ม ไม่ค่อยเห็นการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ

4.3 การศึกษาสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดและที่ใช้สารตัวเติมเสริมแรง เพื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติมาตรฐานของไบโพลาร์เพลด

4.3.1 ผลของปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต

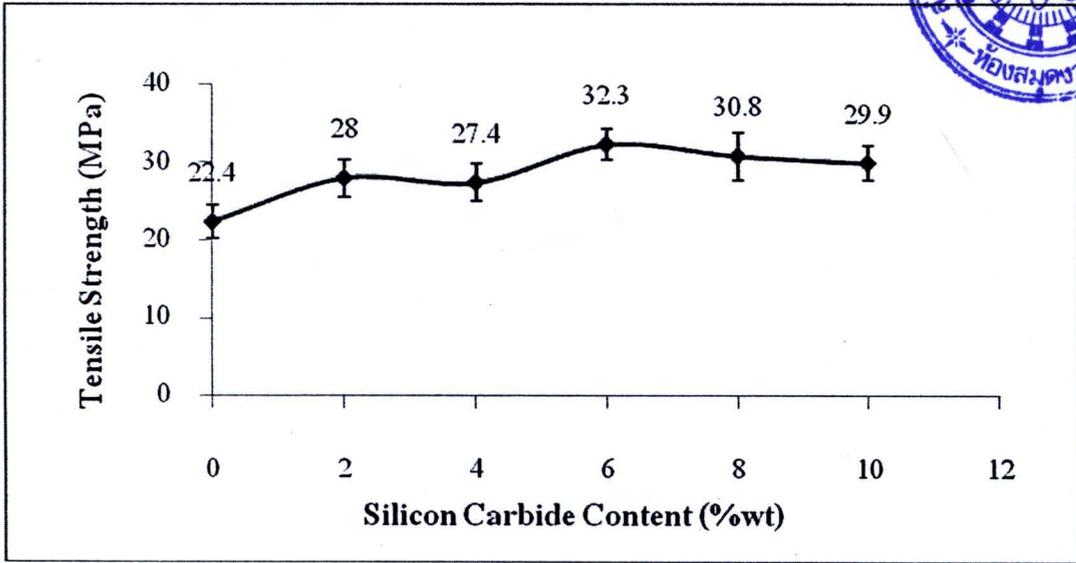
การทดสอบสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตที่ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลอง สามารถสรุปสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต ดังตาราง 4.3 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลกับปริมาณแกรไฟต์ของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตดังรูป 4.7 - 4.9 พบว่าเมื่อเติมซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถทำให้สมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตดีขึ้นอย่างชัดเจน อาจเนื่องจากแรงระหว่างผิวสัมผัสอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์สูง จึงเกิดการส่งผ่านแรง ทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nhuapeng และคณะ พบว่าเมื่อเติมซิลิกอนคาร์ไบด์นาโนไวร์ลงในอีพอกซีเรซินที่ 0-15% โดยน้ำหนัก ค่าความแข็ง ค่าความทนต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้น และมีสมบัติการทนต่อการขีดข่วนที่ดีได้ [15]

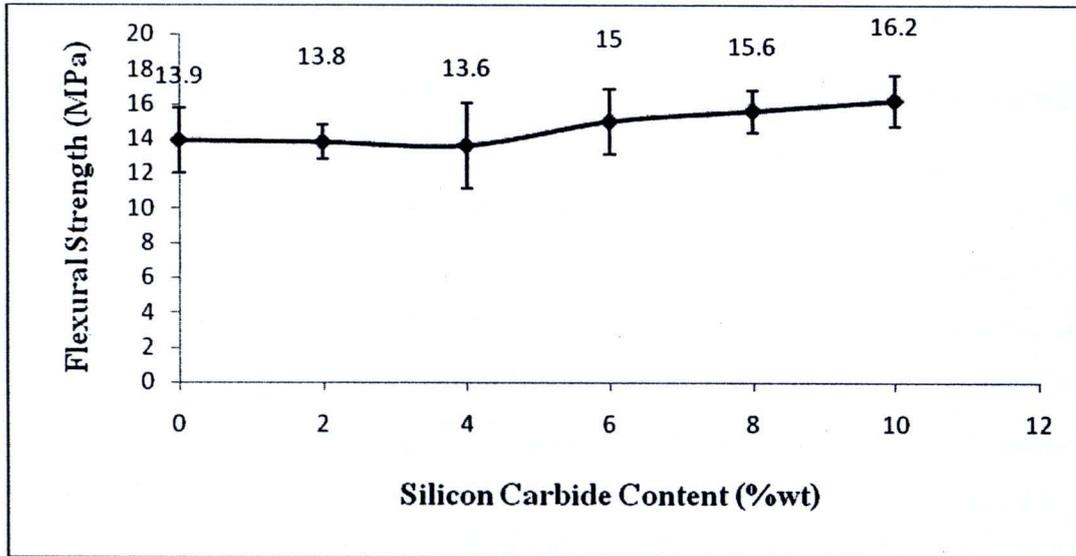
ตาราง 4.3 สรุปสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต

Polymer Composites	Novolac (%)	SiC (%)	TS (MPa)	FS (MPa)	IM (J/m)
SiC0	100	-	22.4 ± 2.18	13.9 ± 1.86	24.3 ± 1.25
SiC2	98	2	28.0 ± 2.40	13.8 ± 1.00	25.8 ± 1.04
SiC4	96	4	27.4 ± 2.42	13.6 ± 2.45	26.2 ± 2.63
SiC6	94	6	32.3 ± 2.00	15.0 ± 1.89	26.7 ± 2.19
SiC8	92	8	30.8 ± 3.08	15.6 ± 1.22	31.3 ± 2.37
SiC10	90	10	29.9 ± 2.26	16.2 ± 1.44	30.0 ± 2.08

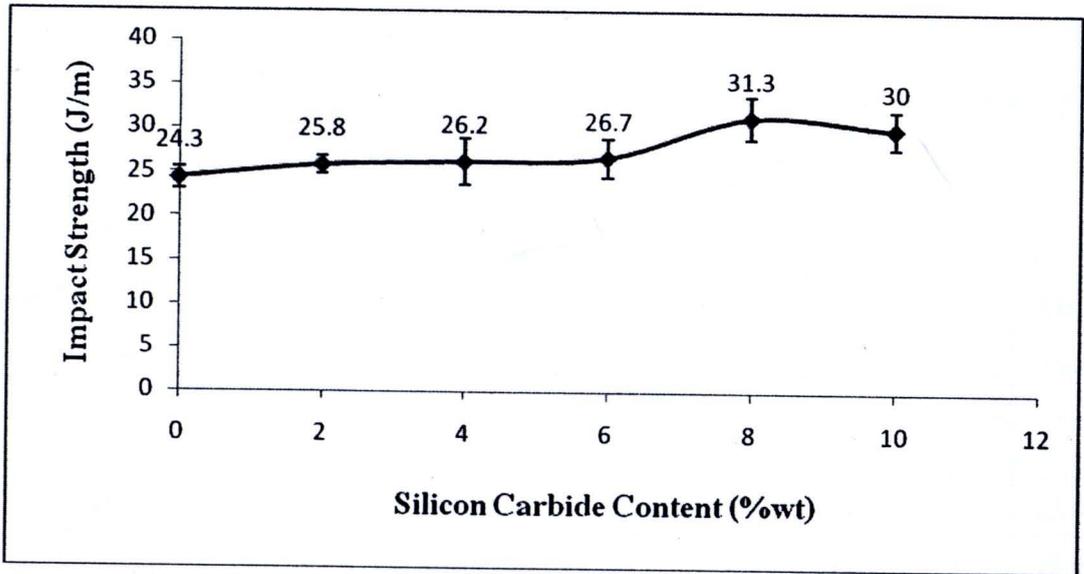
เมื่อ TS = Tensile strength, FS = Flexural strength และ IM = Impact strength



รูป 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของฟินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต



รูป 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงโค้งกับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของฟินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต



รูป 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับปริมาณแกรไฟต์ของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต

4.3.2 ผลของปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า

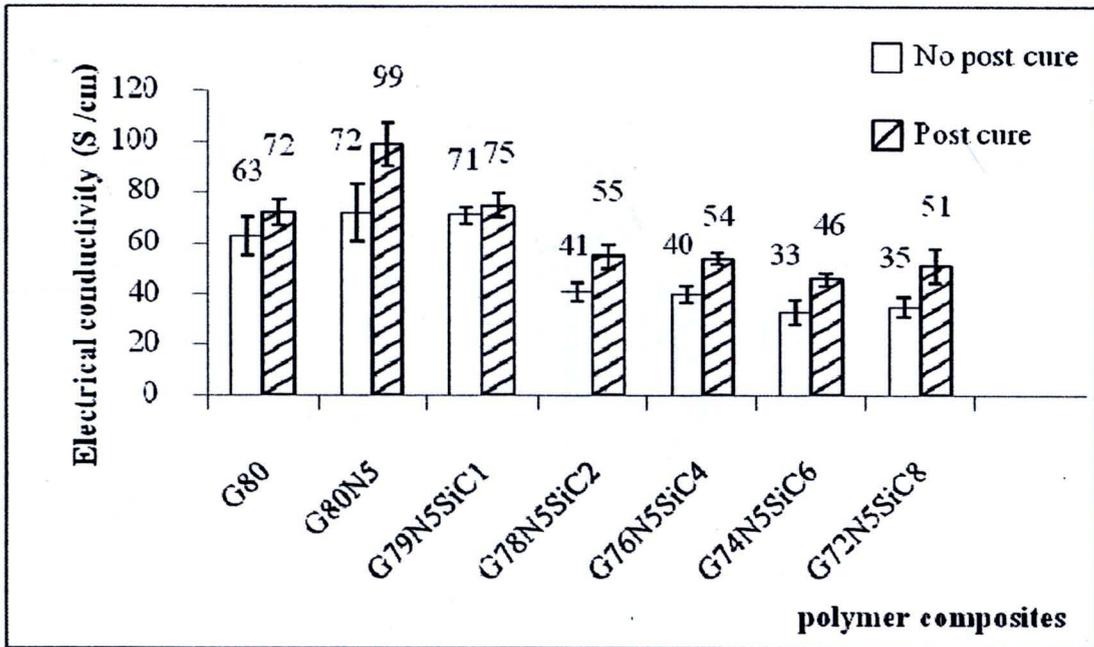
จากผลการทดลองสามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีสัดส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ 0, 1, 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก โดยสัดส่วนของแกรไฟต์จะลดลงไปตามสัดส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น ($G+SiC = 80\%$) ทั้งก่อน และหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ดังตาราง 4.4 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีสัดส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างๆทั้งก่อน และหลังการทำการอบหลังบ่มดังรูป 4.10 - 4.15 ผลการทดลองหาค่าสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า แสดงไว้ในภาคผนวก ก, ข, ค และง

ตาราง 4.4 สมบัติของพีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่สัดส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างๆทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

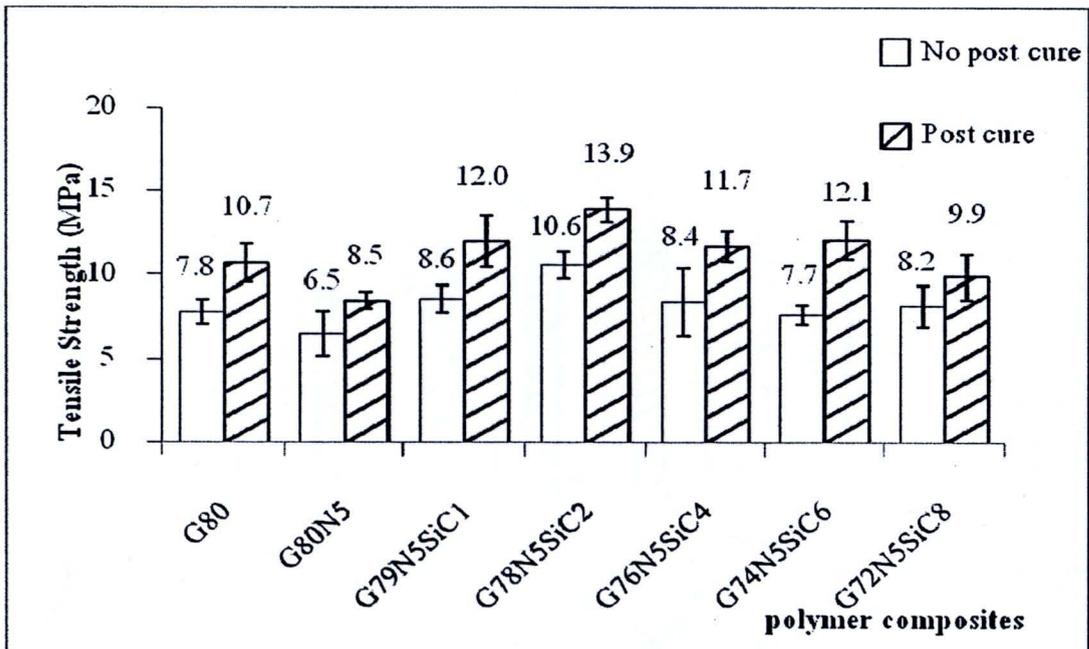
Polymer Composite	G (%)	N (%)	SiC (%)	ZnSt (%)	Post cure 190°C (hours)	σ (S/cm)	TS (MPa)	FS (MPa)	IM (J/m)
G80	80	-	-	1	-	63	7.8	24.8	24.1
G80Po30	80	-	-	1	30	72	10.7	27.0	25.0
G80N5	80	5	-	1	-	72	6.5	21.3	25.0
G80N5Po30	80	5	-	1	30	99	8.5	24.1	26.7
G79N5SiC1	79	5	1	1	-	71	8.6	27.3	28.4
G79N5SiC1Po30	79	5	1	1	30	75	12.0	30.7	30.9
G78N5SiC2	78	5	2	1	-	41	10.6	28.9	26.7
G78N5SiC2Po30	78	5	2	1	30	55	14.0	31.5	28.8
G76N5SiC4	76	5	4	1	-	40	8.4	24.7	25.8
G76N5SiC4Po30	76	5	4	1	30	54	11.7	29.7	28.4
G74N5SiC6	74	5	6	1	-	33	7.7	22.9	27.1
G74N5SiC6Po30	74	5	6	1	30	46	12.1	28.1	28.4
G72N5SiC8	72	5	8	1	-	35	8.2	21.8	26.7
G72N5SiC8Po30	72	5	8	1	30	51	9.9	25.4	26.2

เมื่อ σ = Electrical conductivity, TS = Tensile strength, FS = Flexural strength, IM = Impact strength, G = Graphite, N = Nitrile Rubber (NBR), SiC = Silicon Carbide

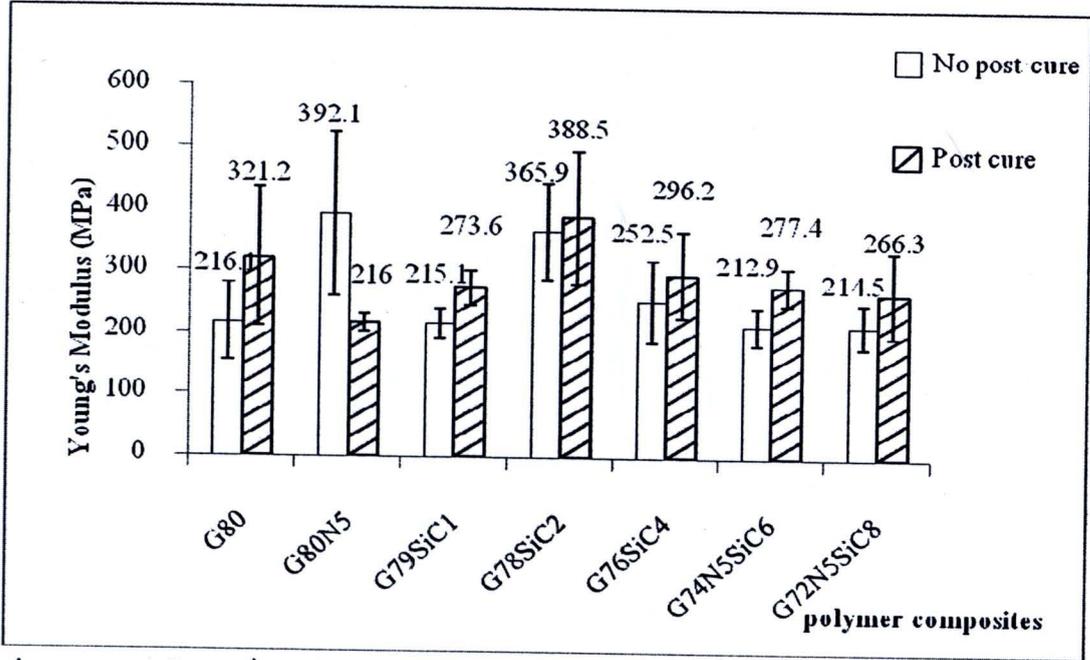
ZnSt = Zinc stearate และ Po30 = Post cure 190 °C 30 hr.



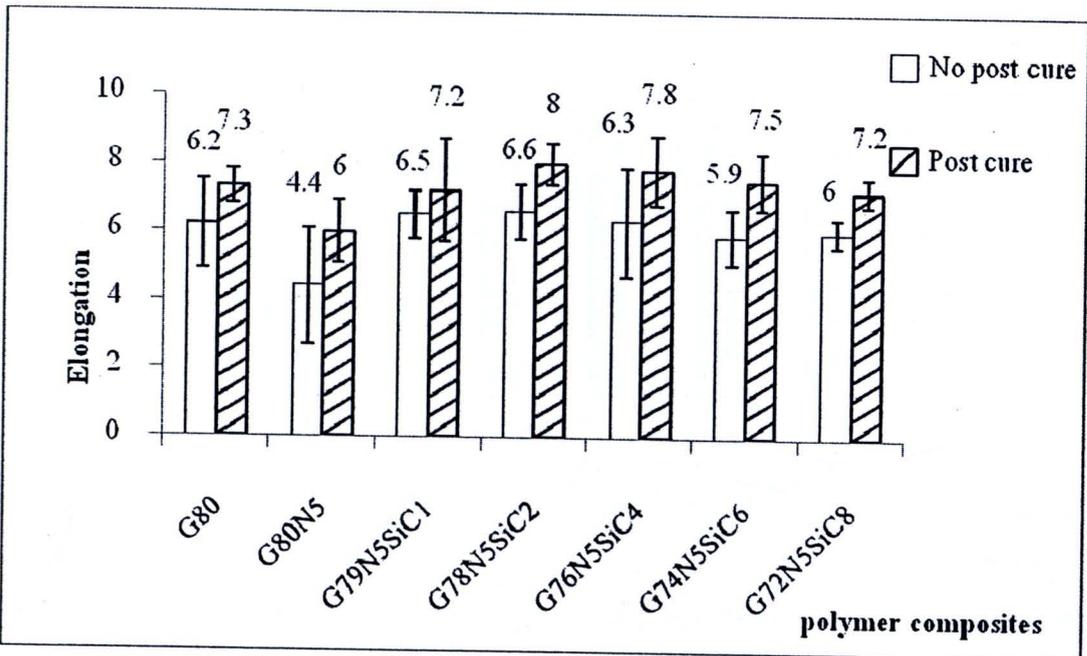
รูป 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของฟินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



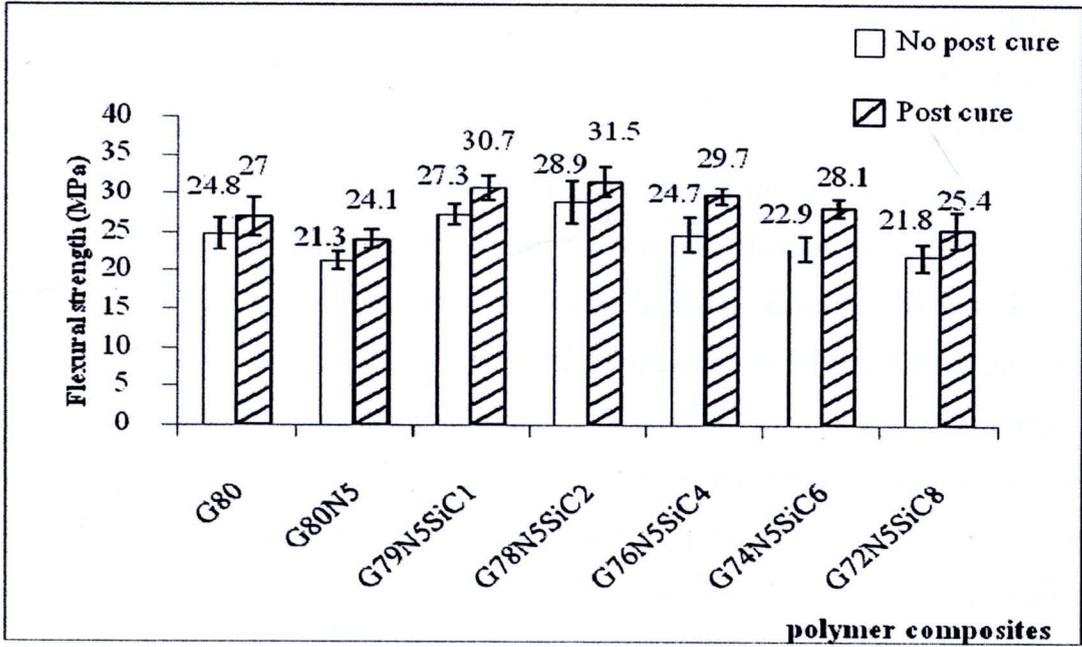
รูป 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของฟินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



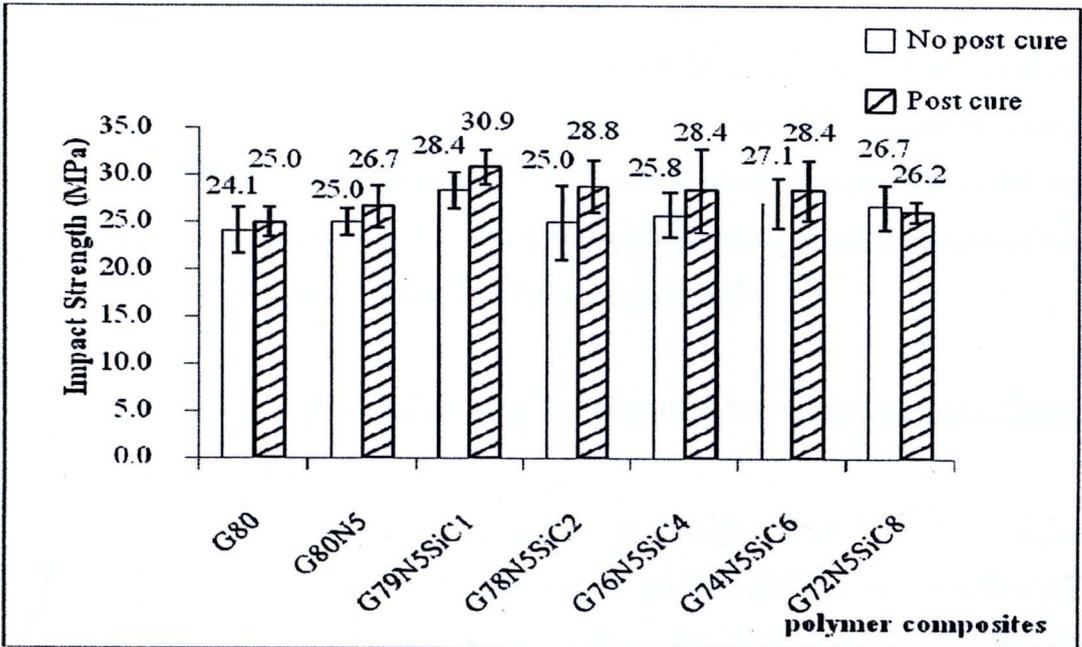
รูป 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยังกับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของพีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดึงยืด กับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของพีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงโค้งงอกับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

จากผลการทดลองตามตาราง 4.4 และรูป 4.10 – 4.15 สามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังการทำกรอบ

บ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ค่าการนำไฟฟ้าของพีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต (G80N5) เมื่อทำการอบหลังบ่ม ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด คือ 99 ซีเมนต่อเซนติเมตร แต่สมบัติเชิงกลต่ำ (จากรูป 4.11 – 4.15) จากนั้นเมื่อทำการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า เข้าไปแทรกตัวอยู่ในคอมโพสิต ทำให้ขัดขวางการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์ โดยที่ซิลิกอนคาร์ไบด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อทำการอบหลังบ่ม ให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงที่ 75 ซีเมนต่อเซนติเมตร แต่ในขณะที่เดียวกันสมบัติเชิงกลของพีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น (จากรูป 4.11 – 4.15) ทั้งค่าความทนแรงดึง ความทนแรงโค้งงอ และความทนแรงกระแทกของพีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต แสดงว่าเกิดแรงระหว่างผิวสัมผัสอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และพีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ จึงเกิดการส่งผ่านแรง ทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่ม ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์เป็น 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตมีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากขนาดของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เล็กกว่าทำให้พื้นที่ผิวสูงกว่าในกรณีของแกรไฟต์ที่มีอนุภาคที่ใหญ่กว่าทำให้ด้วยปริมาณของเมทริกซ์ที่เท่ากันการห่อหุ้มสารตัวเติมที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแรงระหว่างเมทริกซ์และซิลิกอนคาร์ไบด์น้อยลง นอกจากนี้พบว่าทำการอบหลังบ่มสามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตได้ ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากเมื่อทำการอบหลังบ่ม เป็นการลดความเครียด (stress) ของชิ้นงาน และอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นของพีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิต [47] ดังนั้นสมบัติเชิงกลของพีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้น สำหรับค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบในชิ้นงานแน่นขึ้น อนุภาคสารตัวเติมนำไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากขึ้น ทำให้การนำไฟฟ้าสูงขึ้น

4.3.3 ผลของการใช้ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมที่มีต่อสมบัติของพีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า

จากการทดลองของ Dhakate และคณะ [12] พบว่าเมื่อมีการเติมสารตัวเติมผงเขม่าดำร่วมลงไป ในคอมโพสิต ที่ 20 – 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติที่ได้จะเหมาะสมกับการทำคอมโพสิตไบโพลาร์เพลตเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง และค่าการนำไฟฟ้าจากการเติมแกรไฟต์เพียงอย่างเดียวค่าที่ได้ยังไม่ถึงมาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงมีการพัฒนาการนำไฟฟ้าโดยใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าสองชนิด ได้แก่ แกรไฟต์และผงเขม่าดำ

จากการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบ โดยมีการเติมสารตัวเติมที่แตกต่างกัน ได้แก่ สารตัวเติมร่วมเป็นผงเขม่าดำที่ 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติ

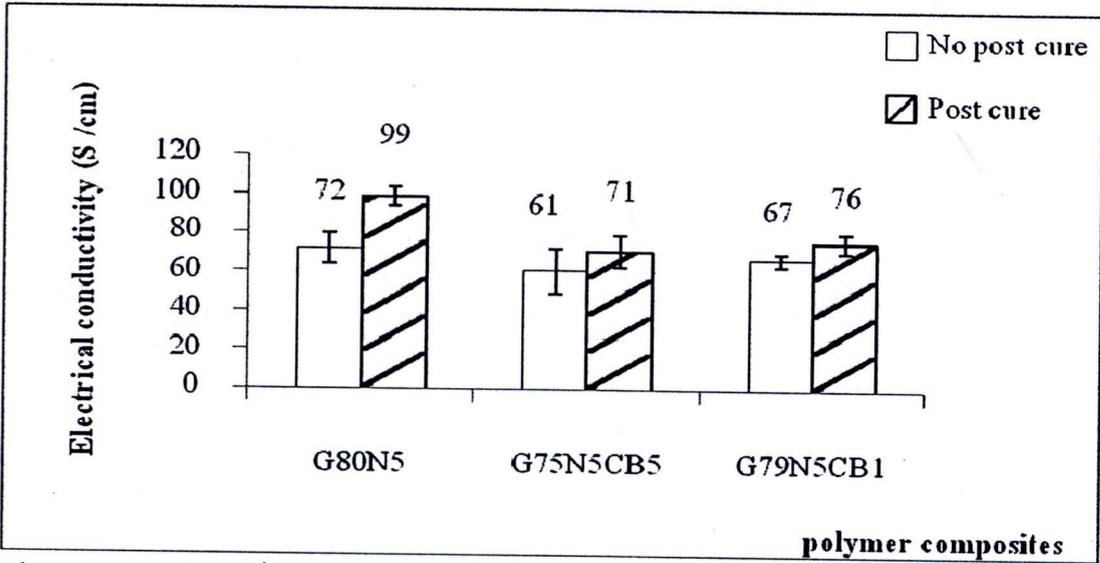
เชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมทั้งก่อน และหลัง การทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ดังตาราง 4.5 และกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำ ไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมทั้งก่อน และหลังการทำการอบหลังบ่ม ดังรูป 4.16 - 4.21 ผลการ ทดลองหาค่าสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า แสดงไว้ในภาคผนวก ก, ข, ค และง

ตาราง 4.5 สมบัติของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมทั้งก่อน และหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง

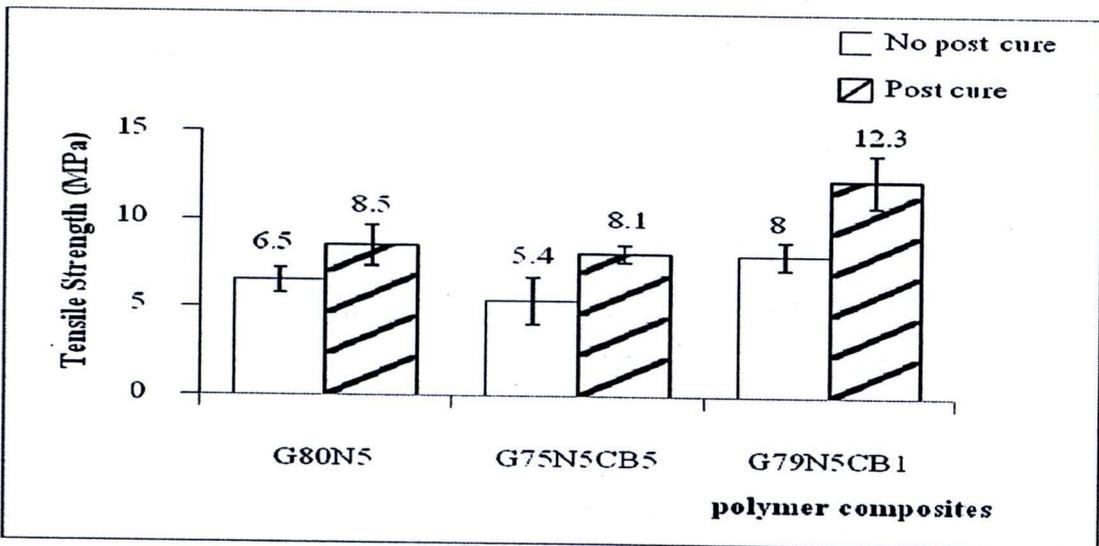
Polymer Composite	G (%)	N (%)	CB (%)	ZnSt (%)	Post cure 190°C (hours)	σ (S/cm)	TS (MPa)	FS (MPa)	IM (J/m)
G80N5	80	5	-	1	-	72	6.5	21.3	25.0
G80N5Po30	80	5	-	1	30	99	8.5	24.1	26.7
G75N5CB5	75	5	5	1	-	61	5.4	26.0	25.9
G75N5CBPo30	75	5	5	1	30	71	8.1	28.2	27.4
G79N5CB1	79	5	1	1	-	64	8.0	24.9	25.5
G79N5CB1Po30	79	5	1	1	30	67	12.3	27.5	27.5

เมื่อ σ = Electrical conductivity, TS = Tensile strength, FS = Flexural strength, IM = Impact strength, G = Graphite, N = Nitrile Rubber (NBR), SiC = Silicon Carbide, CB = Carbon Black

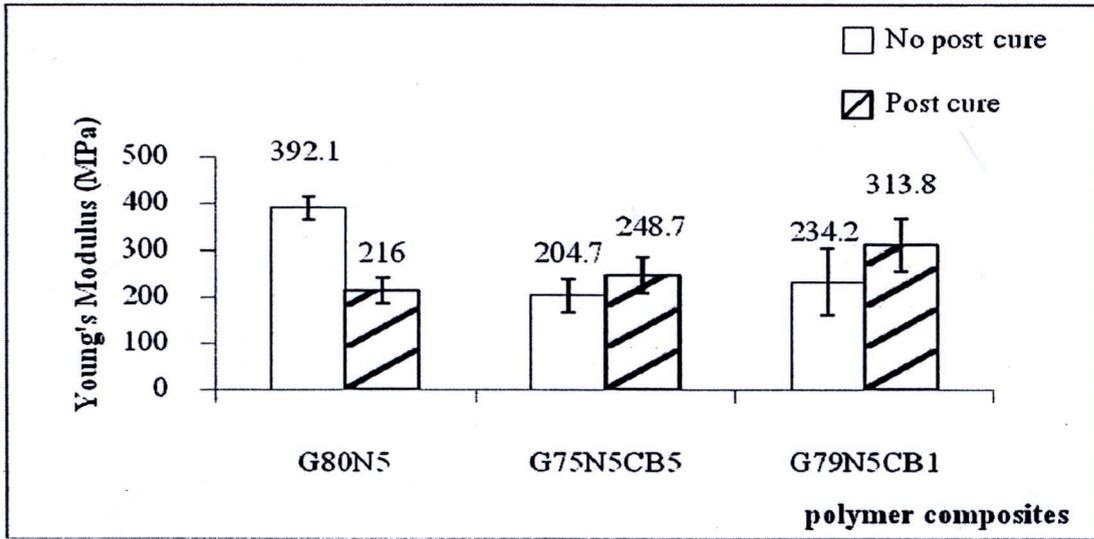
ZnSt = Zinc stearate และ Po30 = Postcure 190°C, 30 hr.



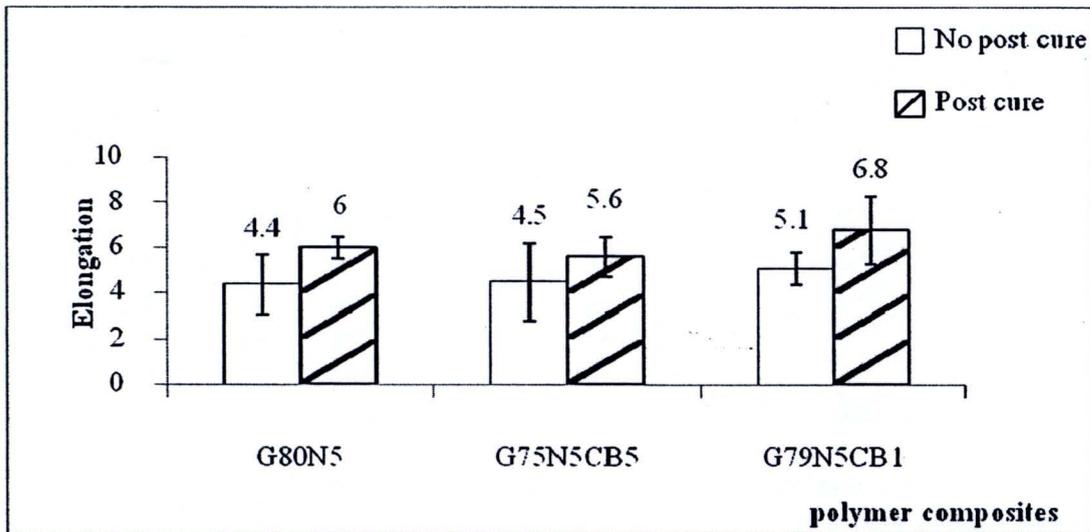
รูป 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วม ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



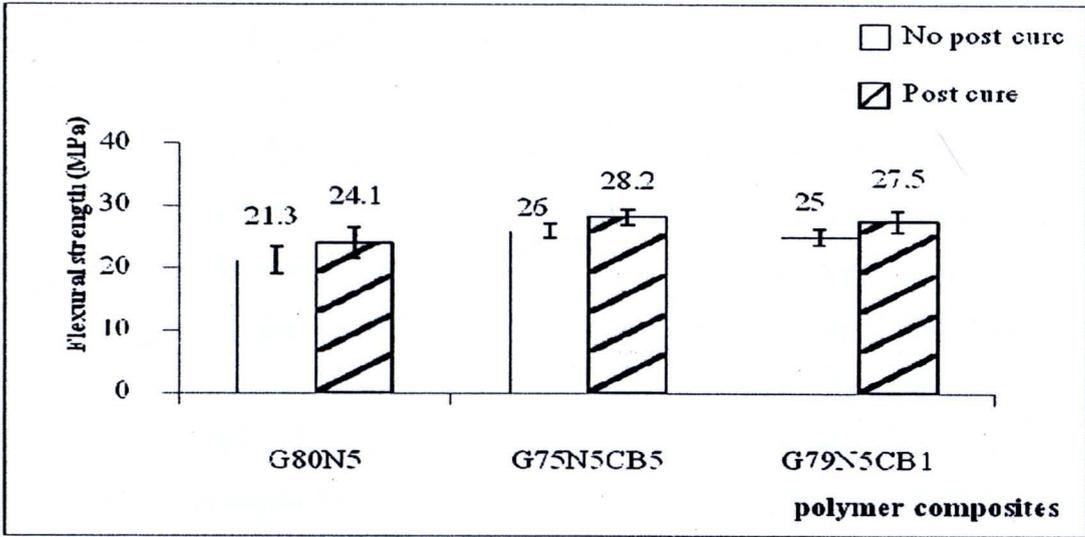
รูป 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วม ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



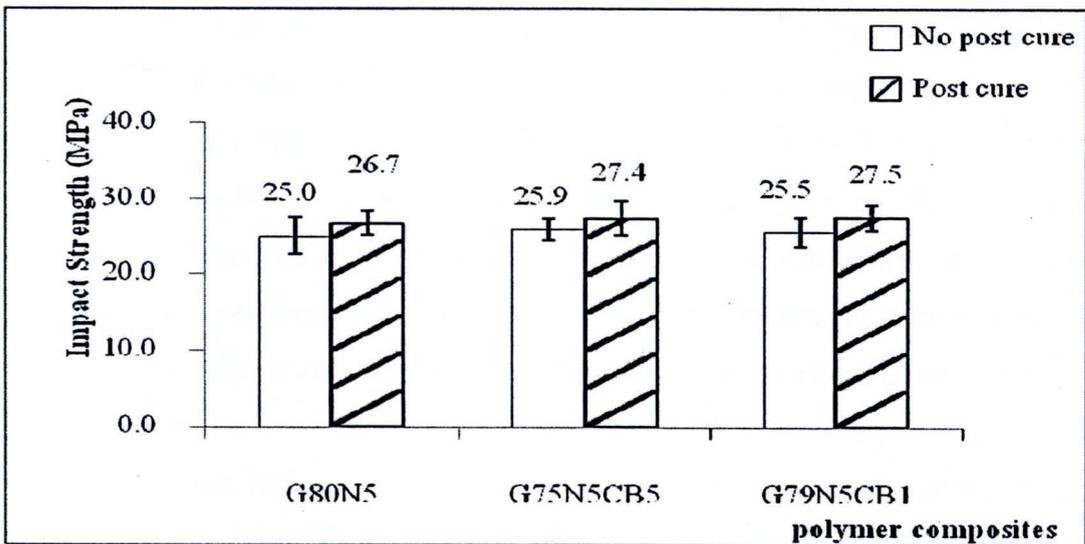
รูป 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยังของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วม ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดึงยืดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วม ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงโค้งงอของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วม ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วม ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

จากผลการทดลองตามตาราง 4.5 และรูป 4.16 - 4.21 สามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง โดยการทดลองนี้เราจะใช้ปริมาณผงเขม่าดำที่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้ผงเขม่าดำในปริมาณสูงจะทำ

ให้คอมโพสิตมีความเปราะ และขึ้นรูปได้ยาก [7] เมื่อเปรียบเทียบคอมโพสิตที่เติมเฉพาะแกรไฟต์ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับคอมโพสิตที่เติมผงเขม่าดำที่ 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าคอมโพสิตที่เติมผงเขม่าดำที่ 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าคอมโพสิตที่เติมเฉพาะแกรไฟต์ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจเนื่องจาก เป็นการผสมแบบผง คอมโพสิตที่เติมผงเขม่าดำอาจเกิดการกระจายตัวของผงเขม่าดำที่ไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เพราะผงเขม่าดำที่ใช้มีอนุภาคขนาดเล็ก ($< 44 \mu\text{m}$) จึงทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันระหว่างผงเขม่าดำ ส่วนค่าความทนแรงโค้งงอ และความทนแรงกระแทกมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความทนแรงดึง คอมโพสิตที่เติมผงเขม่าดำที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าที่สูงสุด ทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่ม ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Du และคณะ [48] ที่ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้ในไบโพลาร์เพลตโดยใช้อีพอกซีเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยพบว่าเมื่อใช้แกรไฟต์ขยายและผงเขม่าดำผสมเข้าด้วยกัน โดยคงปริมาณผงเขม่าดำไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เพิ่มปริมาณแกรไฟต์ขยายไปจนถึง 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการนำไฟฟ้า อยู่ในช่วง 200 – 500 ซีเมนต่อเซนติเมตร เกิดการเชื่อมต่อเส้นทางการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์และผงเขม่าดำได้ดี อาจสืบเนื่องมาจากผงเขม่าดำมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง (high surface area) มีขนาดอนุภาคเล็กจึงแทรกซึมเชื่อมต่อเส้นทางการนำไฟฟ้า ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น แต่จะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ลดลงเมื่อมีปริมาณแกรไฟต์ขยายที่มากกว่า 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก งานวิจัยของ Kakati และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาความแตกต่างของสมบัติเชิงกลของไบโพลาร์เพลตโดยใช้พอลิเมอร์สองชนิดคือ พอลิฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ชนิดของเหลวและชนิดผง จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพเช่น ความหนาแน่น ความพรุนตัว ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความแข็งแรง ค่าความทนต่อแรงดึง พบว่าสมบัติเชิงกลของไบโพลาร์เพลตที่ใช้พอลิเมอร์สองชนิดนั้นมีความแตกต่างกัน พอลิฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ชนิดผงนั้นจะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าชนิดของเหลว โดยที่อัตราส่วนของผงเขม่าดำ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความทนต่อแรงโค้งงอของคอมโพสิตพอลิฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ชนิดผงและชนิดเหลว มีค่าเท่ากับ 75 และ 50 MPa ตามลำดับ แต่พอลิฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ชนิดของเหลว นั้นจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าชนิดผงเล็กน้อย โดยที่อัตราส่วนของผงเขม่าดำ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตพอลิฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ชนิดผงและชนิดเหลว มีค่าเท่ากับ 250 และ 270 $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ตามลำดับ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน $\text{O}-\text{H}$ มากกว่า แต่ฟีนอลิกเรซินชนิดผงให้ค่าความพรุนตัวที่น้อยกว่าและให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

4.3.4 ผลของการใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงที่มีต่อสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า

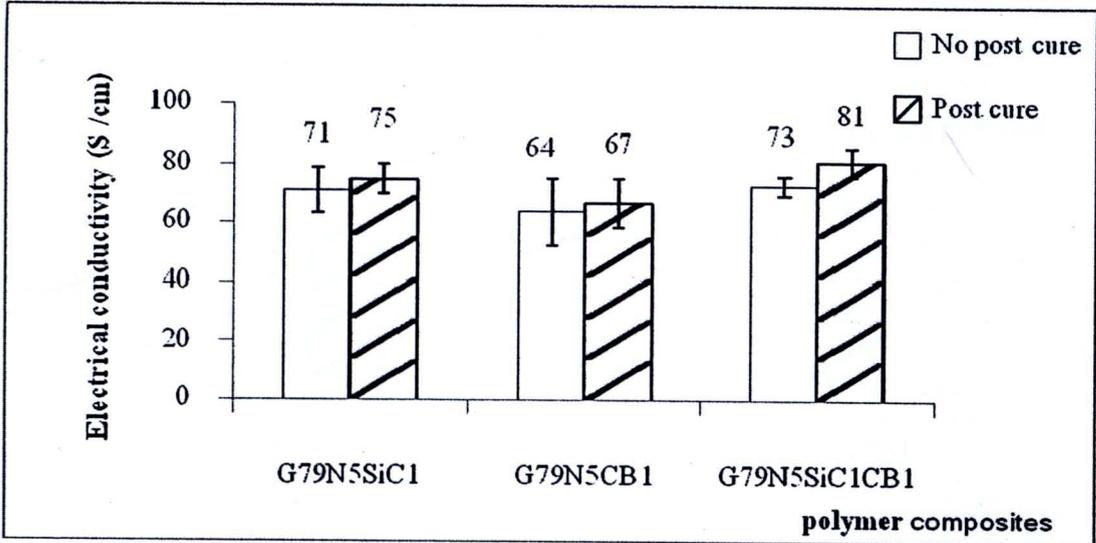
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตที่เติมผงเขม่าดำที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าคอมโพสิตที่เติมผงเขม่าดำที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพียงเล็กน้อย แต่ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่า จึงเลือกเติมผงเขม่าดำที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในคอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรง โดยเลือกเติมที่อัตราส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากได้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด และมีสมบัติเชิงกลที่ดี

จากผลการทดลอง สามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง ดังตาราง 4.6 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่ม ดังรูป 4.22 - 4.27 ผลการทดลองหาค่าสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า แสดงไว้ในภาคผนวก ก, ข, ค และง ตาราง 4.6 สมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง

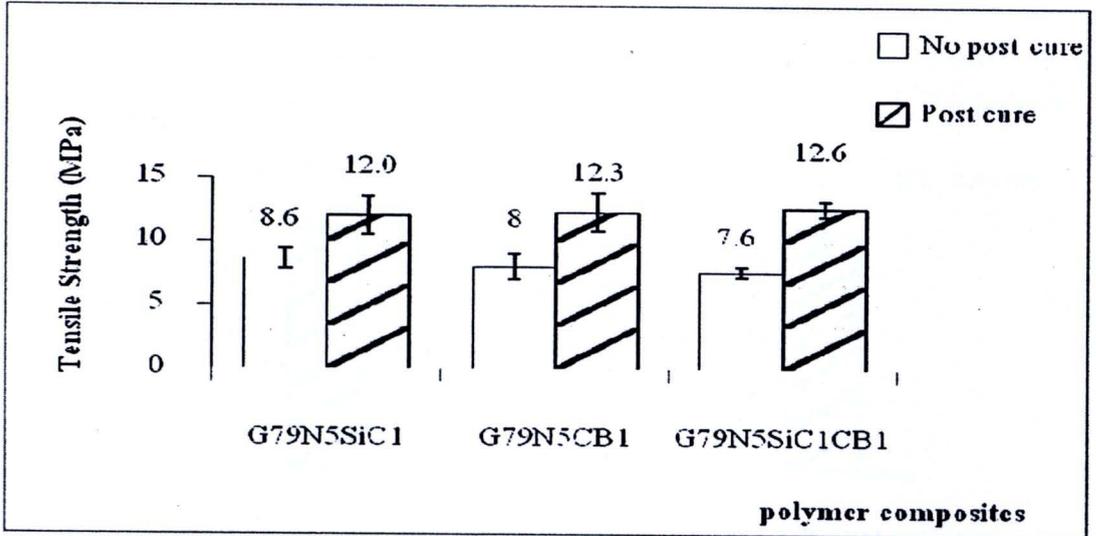
Polymer Composite	G (%)	N (%)	SiC (%)	CB (%)	ZnSt (%)	Post cure 190°C (hours)	σ (S/cm)	TS (MPa)	FS (MPa)	IM (J/m)
G79N5CB1	79	5	-	1	1		64	8.0	24.9	25.5
G79N5CB1Po30	79	5	-	1	1	30	67	12.3	27.5	27.5
G79N5SiC1	79	5	1	-	1	-	71	8.6	27.3	28.4
G79N5SiC1Po30	79	5	1	-	1	30	75	12.0	30.7	30.9
G79N5SiC1CB1	79	5	1	1	1	-	73	7.6	29.4	28.5
G79N5SiC1CB1 Po30	79	5	1	1	1	30	81	12.6	31.4	31.4

เมื่อ σ = Electrical conductivity, TS = Tensile strength, FS = Flexural strength, IM = Impact strength, G = Graphite, N = Nitrile Rubber (NBR), SiC = Silicon Carbide, CB = Carbon Black

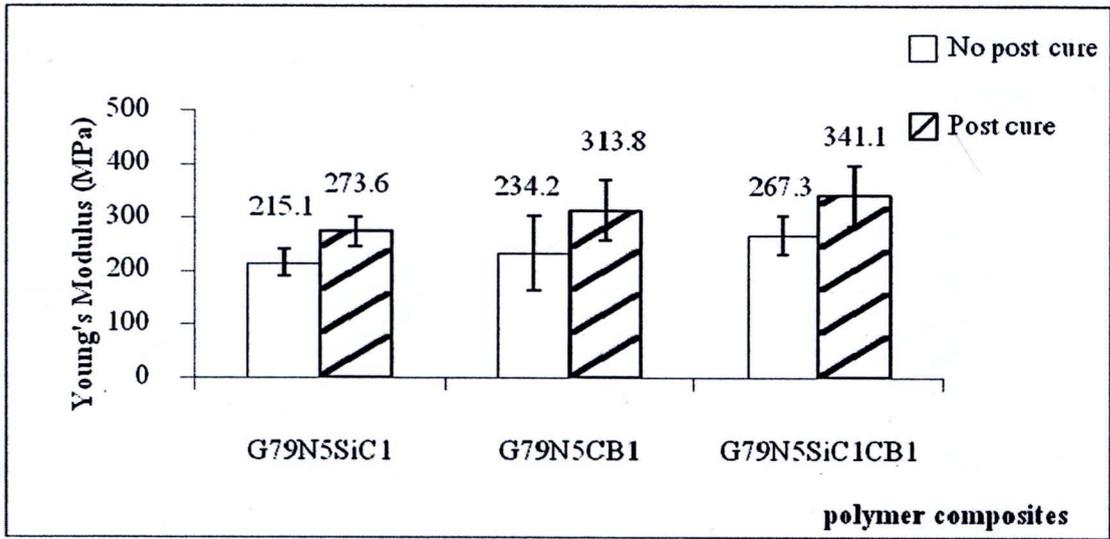
ZnSt = Zinc stearate และ Po30 = Postcure 190°C 30 hr.



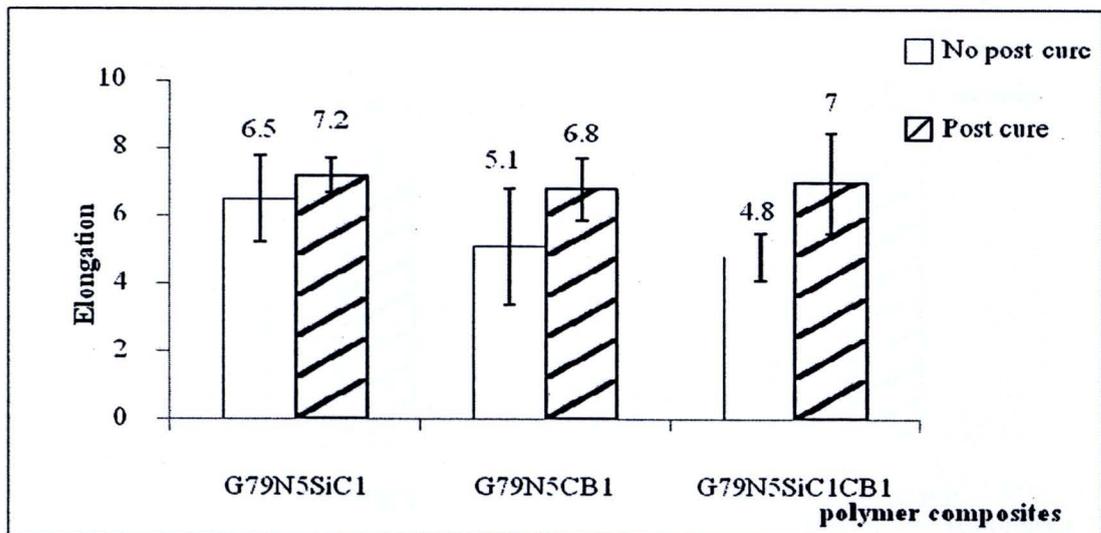
รูป 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



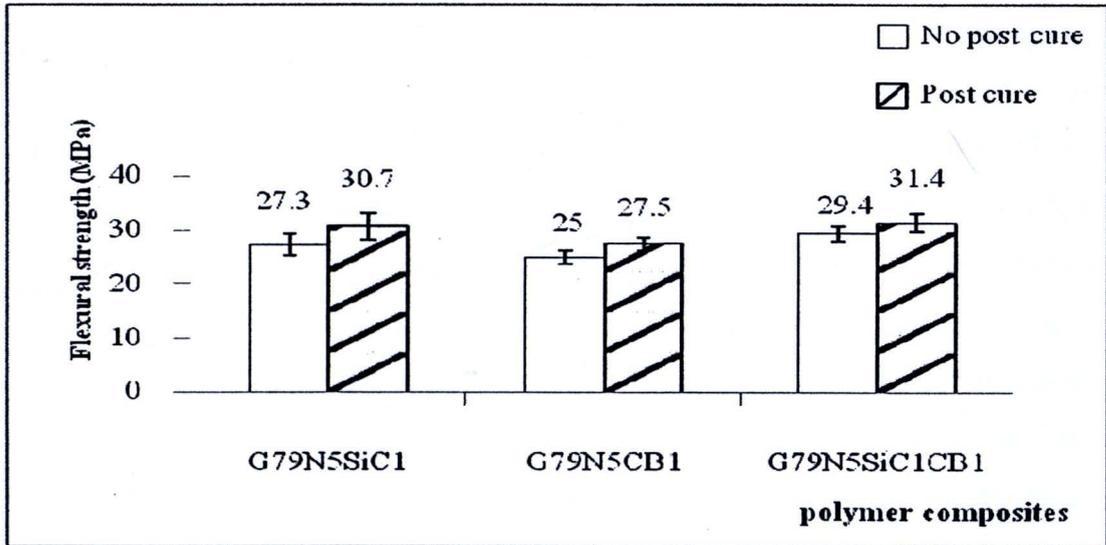
รูป 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



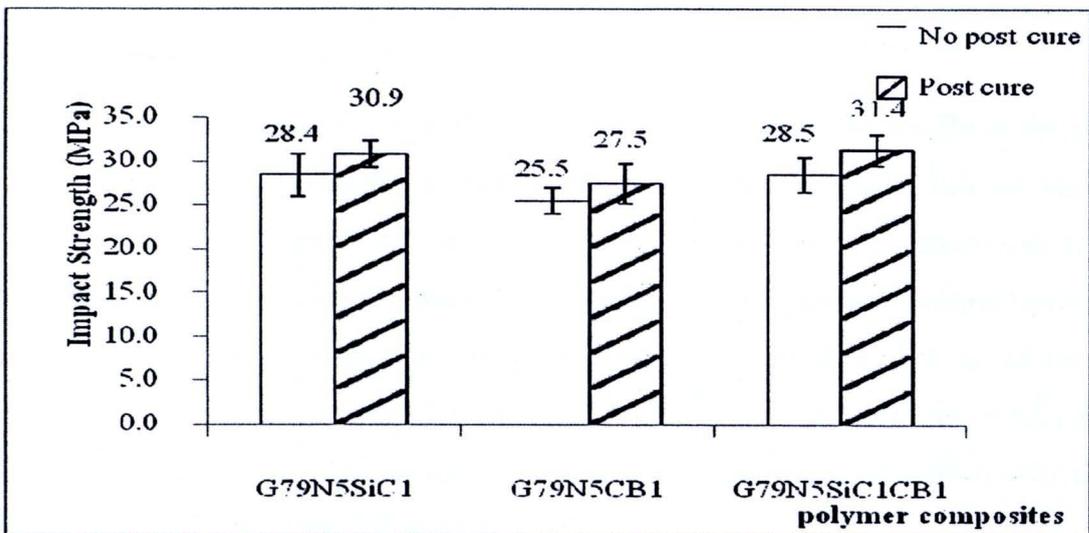
รูป 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยังของฟินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดึงยืดของฟินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงโค้งงอของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง

จากผลการทดลองตามตาราง 4.6 และรูป 4.22 – 4.27 สามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกับสารเสริมแรงทั้งก่อนและหลังการทำกรอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง โดยคอมโพสิตที่มีการเพิ่มปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (G79N5CB1SiC1)

เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำที่ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก (G79N5CB1) และคอมโพสิตที่เติมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก (G79N5SiC1) พบว่า คอมโพสิตที่มีการเพิ่มปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก (G79N5CB1SiC1) ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่ม อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักทำให้ปริมาณรวมในแม่แบบเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เกิดการยึดเกาะกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างในโครงสร้างของคอมโพสิตลดลง เกิดการเชื่อมโยงของอนุภาคนำไฟฟ้าได้มากขึ้น [17] ส่วนสมบัติเชิงกลมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับวัสดุที่จะนำมาใช้ในการผลิต ไบโพลาร์เพลต พบว่าการนำไฟฟ้าของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตยังให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (> 100 ซีเมนต่อเซนติเมตร) แต่เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ Plug Power [6] พบว่ามีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (> 25 เมกะพาสคัล)

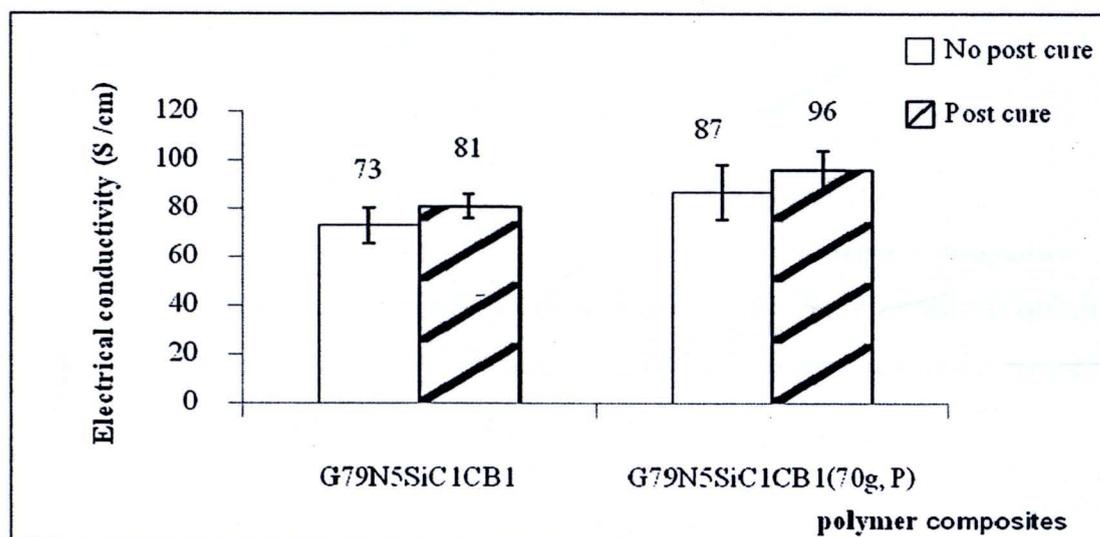
4.3.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิตที่มีต่อสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า

จากผลการทดลอง สามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ดังตาราง 4.7 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเพิ่มปริมาณจากเดิม 100 เปอร์เซนต์ เท่ากับ 60 กรัม เพิ่มขึ้นเป็น 70 กรัม และเปลี่ยนแปลงความดันจากเดิม 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพิ่มขึ้นเป็น 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มดังรูป 4.28 - 4.33 ผลการทดลองหาค่าสมบัติของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า แสดงไว้ในภาคผนวก ก, ข, ค และง

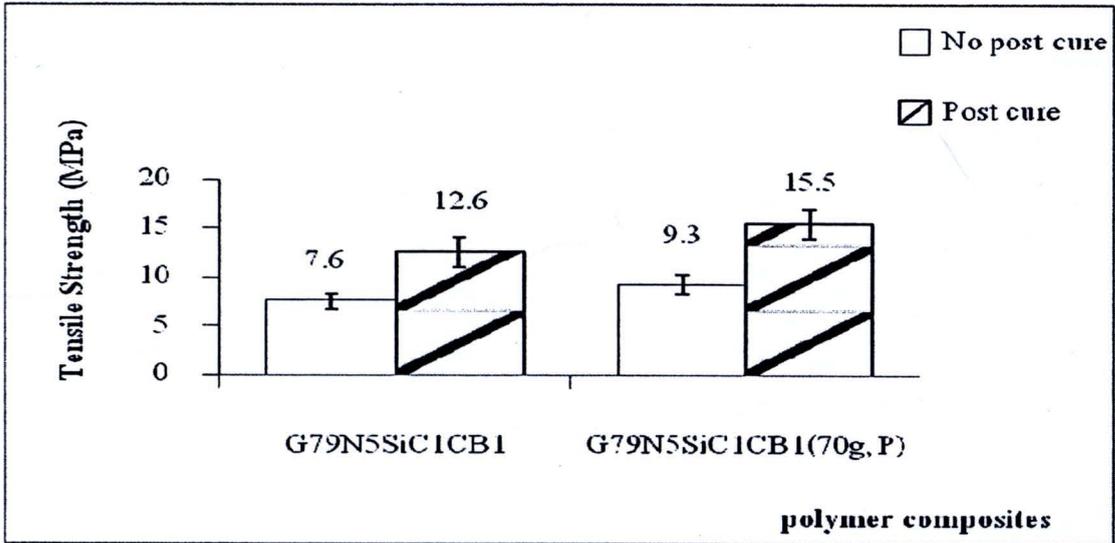
ตาราง 4.7 สมบัติของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง

Polymer Composite	G (%)	N (%)	SiC (%)	CB (%)	ZnSt (%)	Post cure 190°C (hours)	σ (S/cm)	TS (MPa)	FS (MPa)	IM (J/m)
G79N5SiC1CB1	79	5	1	1	1	-	73	7.6	29.4	28.5
G79N5SiC1CB1 Po30	79	5	1	1	1	30	81	12.6	31.4	31.4
G79N5SiC1CB1 (70g, P)	79	5	1	1	1	-	87	9.3	33.5	32.8
G79N5SiC1CB1 Po30 (70g, P)	79	5	1	1	1	30	96	15.5	41.5	35.5

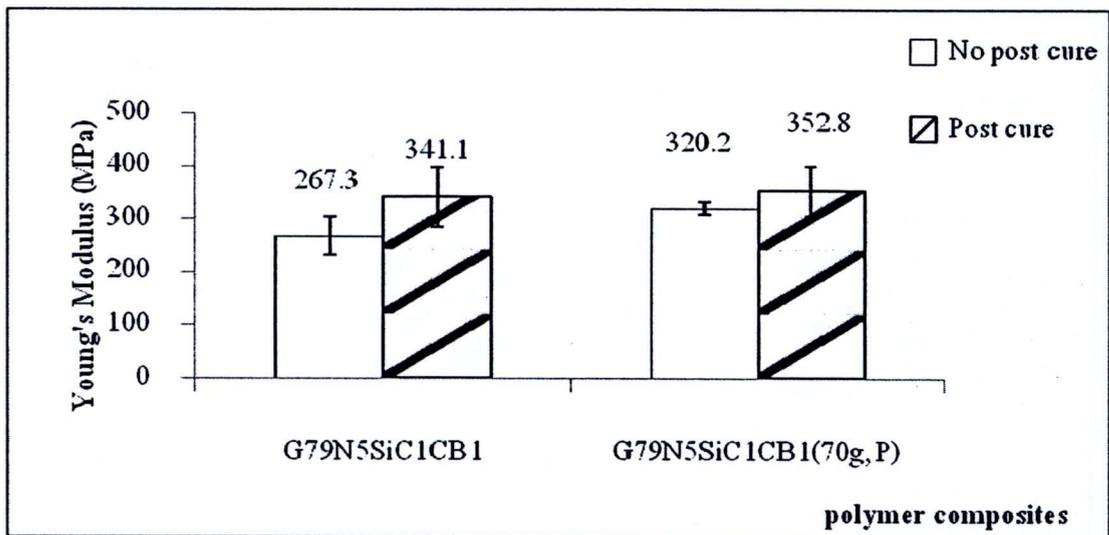
เมื่อ σ = Electrical conductivity, TS = Tensile strength, FS = Flexural strength, IM = Impact strength, G = Graphite, N = Nitrile Rubber (NBR), SiC = Silicon Carbide, CB = Carbon Black, ZnSt = Zinc stearate, Po30 = Postcure 190°C 30 hr, 70g = เพิ่มปริมาณจาก 60 กรัม เป็น 70 กรัม และ P = ที่ความดัน 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



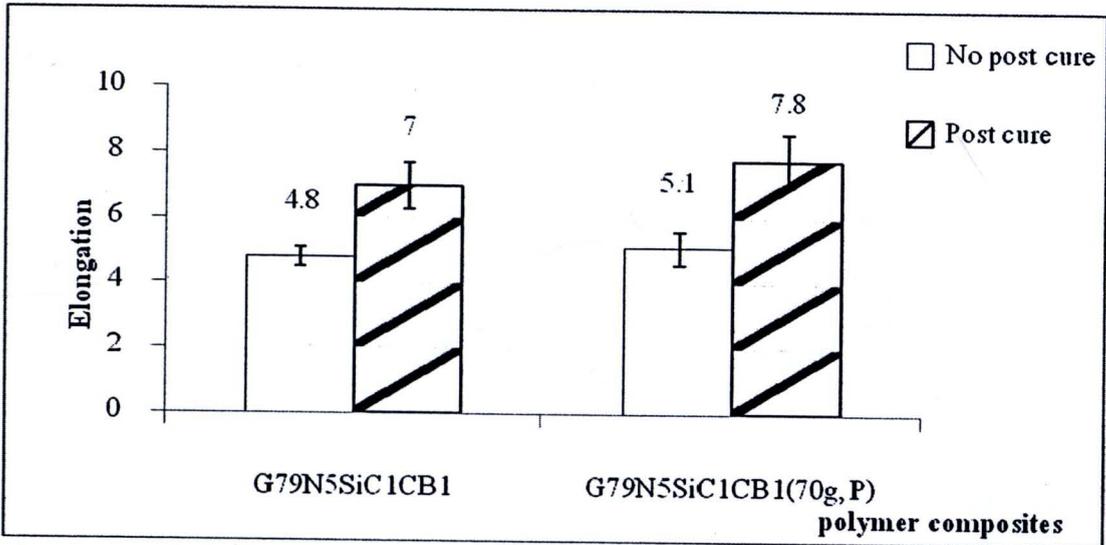
รูป 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



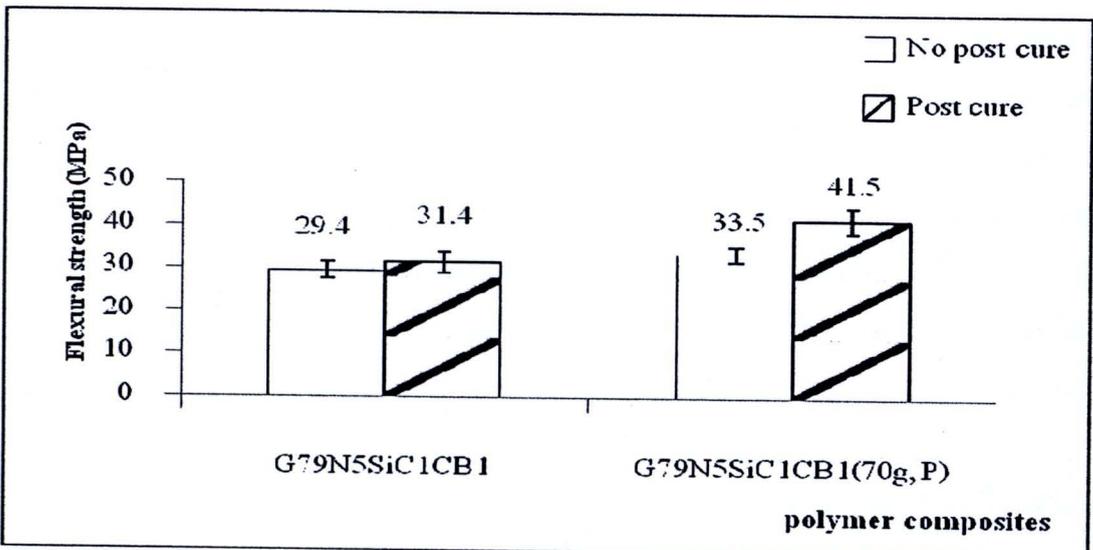
รูป 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



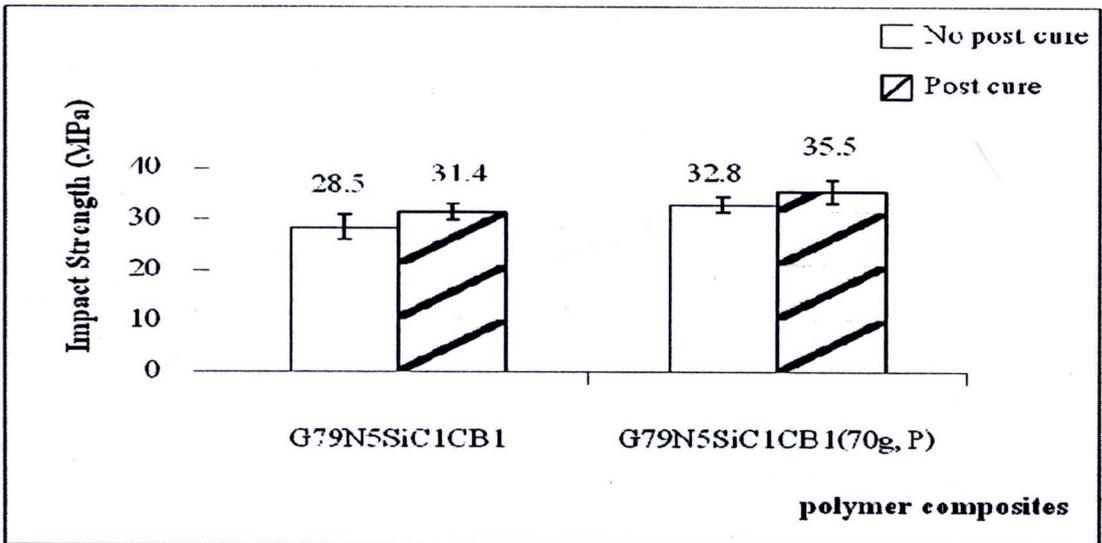
รูป 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยังของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดึงยืดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงโค้งงอของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง



รูป 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาณของคอมโพสิต ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่ 190°C ที่เวลา 30 ชั่วโมง

จากผลการทดลองตามตาราง 4.7 และรูป 4.28 – 4.33 สามารถสรุปสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของคอมโพสิต จากเดิม 100 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 60 กรัม เพิ่มขึ้นเป็น 70 กรัม และเปลี่ยนแปลงความดันจากเดิม 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพิ่มขึ้นเป็น 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทั้งก่อนและหลังการทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของคอมโพสิต 60 กรัม เพิ่มขึ้นเป็น 70 กรัม และเปลี่ยนแปลงความดันจากเดิม 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพิ่มขึ้นเป็น 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้อนุภาคในโครงสร้างโมเลกุลภายในคอมโพสิตชิดกันมากขึ้น มีความหนาแน่นและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงเพิ่มขึ้น

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุที่จะนำมาใช้ในการผลิตไบโพลาร์เพลต พบว่าเมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน (100 ซีเมนต่อเซนติเมตร) และความทนแรงโค้งงอของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต ในตาราง 4.7 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ DOE และ Plug Power ดังตาราง 2.1 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าและค่าความทนต่อแรงโค้งงอของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งค่าความทนแรงโค้งงอจะเป็นค่าที่ระบุความสามารถในการใช้งานนี้ ค่อนข้างชัดเจนกว่าค่าอื่นๆ

และเมื่อนำผลค่าการนำไฟฟ้าจากการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าทางเชิงพาณิชย์พบว่าค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จาก [G79SiC1CB1Po30 (70g, P)] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96 ซีเมนต่อเซนติเมตร มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าไบโพลาร์เพลตของบางบริษัท ดังตาราง 4.8

จากตาราง 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนี้ได้ค่าสูงกว่าค่าทางเชิงพาณิชย์ของบางบริษัทเช่น LANL, Premix, Plug Power และมีค่าใกล้เคียงกับของ BMC ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตที่ได้จากการทดลองนี้สามารถผลิตเป็นไบโพลาร์เพลตในเชิงพาณิชย์ได้

ตาราง 4.8 สมบัติการนำไฟฟ้าของไบโพลาร์เพลตที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ของบริษัทต่างๆและจากงานวิจัย [38,49]

Manufacturer	Polymer matrix	Filler	Content of filler (wt%)	Electrical conductivity (S/cm)
GE	PVDF	Graphite	80	119
GE	PVDF	Graphite + Carbon fiber	64 + 16	109
LANL	Vinyl Ester	Graphite	68	60
Premix	Vinyl Ester	Graphite	68	85
BMC	Vinyl Ester	Graphite	70	95
Plug Power	Vinyl Ester	Graphite	68	55
Virginia Tech	PET	Graphite + Glass fiber	65 + 7	230
Virginia Tech	PPS	Graphite + Carbon fiber	70 + 6	271