

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าได้แก่ อะเซทิลีนแบล็ค แกรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนกับพอลิพรอพิลีนที่มีร้อยละต่างๆ โดยน้ำหนัก โดยศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยา การนำไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

4.1 สมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าก่อนที่จะนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์คอมโพสิตได้แก่ การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน ด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของอะเซทิลีนแบล็คและแกรไฟต์และการวิเคราะห์ความหนาแน่น สมบัติทางกายภาพของเส้นใยคาร์บอนเป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัทที่ผลิต รวมถึงสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอะเซทิลีนแบล็คด้วย (ภาคผนวก ก)

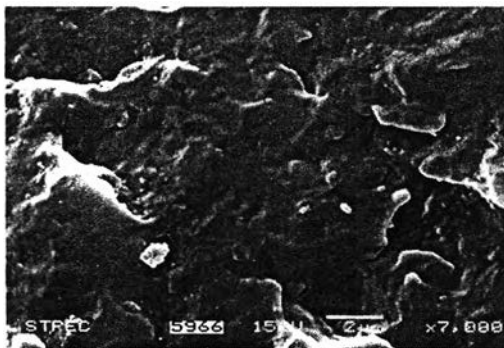
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า

สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	สภาพความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม-เซนติเมตร)
อะเซทิลีนแบล็ค	218	0.015-0.1	0.071	0.03-0.04	สูงสุด 0.25
แกรไฟต์	13	> 0.13	0.484	< 50	
เส้นใยคาร์บอน	0.99		0.497	150	0.0014

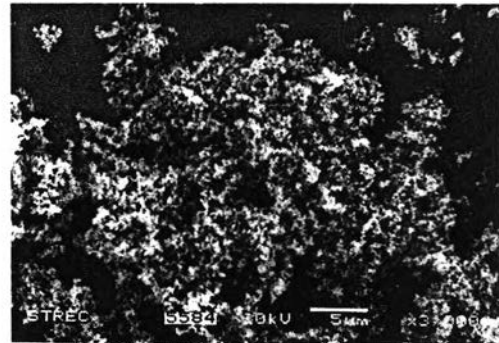
จากตารางที่ 4.1 พบว่าพื้นที่ผิวของอะเซทิลีนแบล็คมีค่า 218 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งมากกว่าแกรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนตามลำดับ รูพรุนของอะเซทิลีนแบล็คมีขนาด 0.015-0.1 ไมโครเมตร ซึ่งจัดอยู่ในช่วง Mesopore ในขณะที่แกรไฟต์มีขนาดรูพรุนจัดอยู่ในช่วง Macropore อะเซทิลีนแบล็คมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดคือ 0.03-0.04 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าอนุภาคของแกรไฟต์

และเส้นใยคาร์บอนตามลำดับและสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอะเซทิลีนแบล็คสูงกว่าเส้นใยคาร์บอน

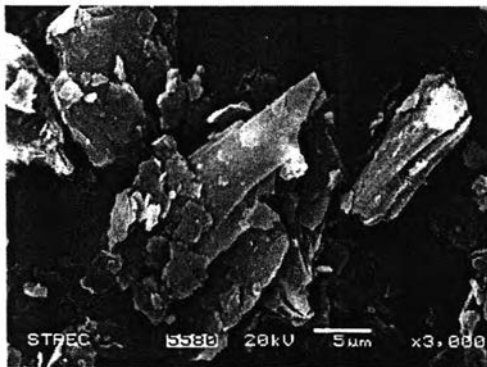
นอกจากนั้นได้ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างสัณฐานวิทยาของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้ามีลักษณะที่แตกต่างกันกล่าวคือ อะเซทิลีนแบล็คมีลักษณะเป็นปุย พื้นผิวไม่เรียบ ในขณะที่แกรไฟต์มีลักษณะเป็นเกล็ดและพื้นผิวก่อนข้างเรียบ ส่วนเส้นใยคาร์บอนมีลักษณะเป็นแท่งกลมและพื้นผิวเรียบ รวมถึงศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนด้วยพบว่าเนื้อของพอลิพรอพิลีนมีลักษณะเรียบ



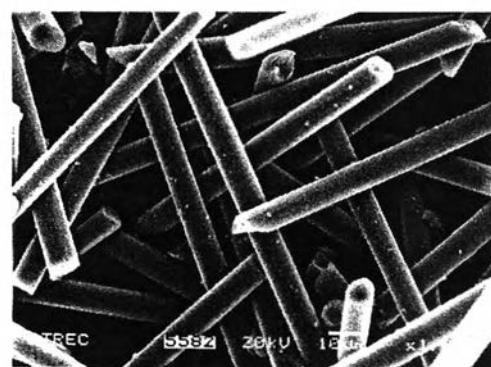
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนและสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า : ก) พอลิพรอพิลีน กำลังขยาย 7,000 เท่า ข) อะเซทิลีนแบล็ค กำลังขยาย 3,000 เท่า ค) แกรไฟต์ กำลังขยาย 3,000 เท่า และ ง) เส้นใยคาร์บอน กำลังขยาย 1,000 เท่า

4.2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต

การศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรม การกระจายตัวและลักษณะรูปร่างของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยศึกษา โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดี่ยวและ พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คและเส้นใยคาร์บอน

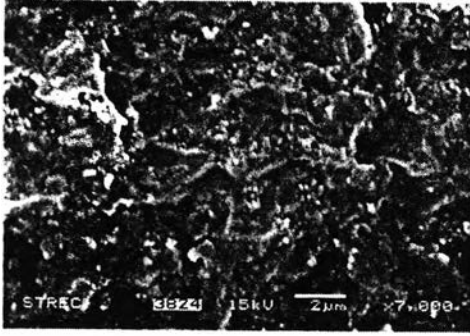
4.2.1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า ชนิดเดี่ยว

4.2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค

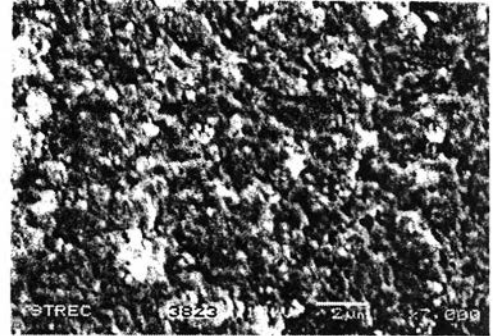
โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตอะเซทิลีนแบล็คแสดงดังรูปที่ 4.2 จุดดำเล็กๆ คืออะเซทิลีนแบล็คแทรกอยู่ในเมตริกซ์พอลิพรอพิลีน พบว่าอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 10 และร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในพอลิพรอพิลีน กระจายตัวเกือบเป็นเนื้อเดียวกับพอลิพรอพิลีนโดย ไม่เกิดการสัมผัสกันของอะเซทิลีนแบล็ค เมื่อปริมาณของอะเซทิลีนแบล็คเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 40 และร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อะเซทิลีนแบล็คจะกระจายตัวในพอลิพรอพิลีนได้ดีขึ้นและเกิดการ สัมผัสและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน รวมทั้งระยะห่างระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับ อะเซทิลีนแบล็คและระยะห่างระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับพอลิพรอพิลีนลดลงด้วย

4.2.1.2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์

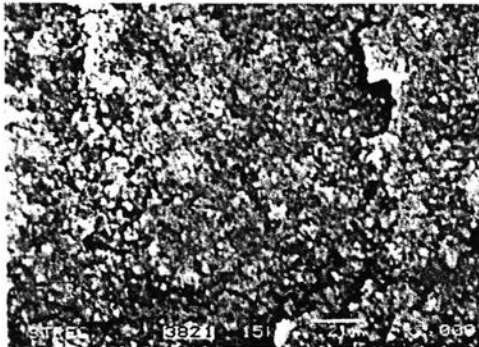
โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตแกรไฟต์แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์มีลักษณะเป็นเกล็ดและลิ้มปนกัน โดย แกรไฟต์จะกระจายตัวอยู่ในเมตริกซ์ของพอลิพรอพิลีน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณของ แกรไฟต์เพิ่มขึ้นโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.1-(ก) พบว่าโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนจะเรียบ แต่โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ คอมโพสิตของแกรไฟต์มีลักษณะพื้นผิวขรุขระแสดงว่า แกรไฟต์ไปแทรกตัวอยู่ระหว่างเมตริกซ์ของ พอลิพรอพิลีน



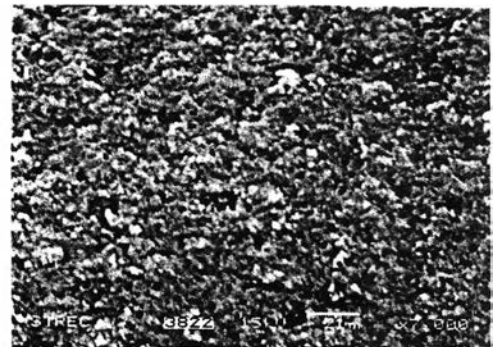
น)



ข)

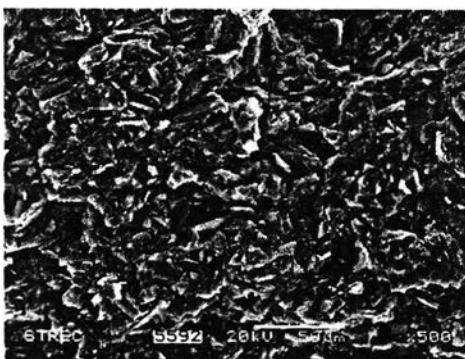


ค)

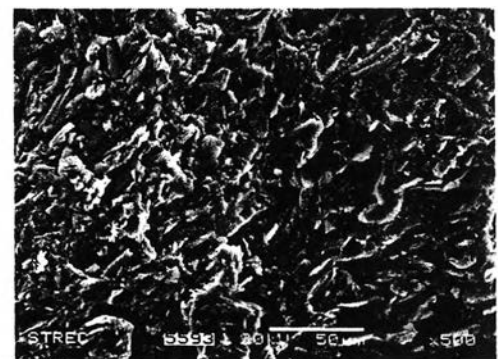


ง)

รูปที่ 4.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตอะเซทิลีนแบล็ค กำลังขยาย 7,000 เท่า
 ก) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ข) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
 ค) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และ ง) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก



น)

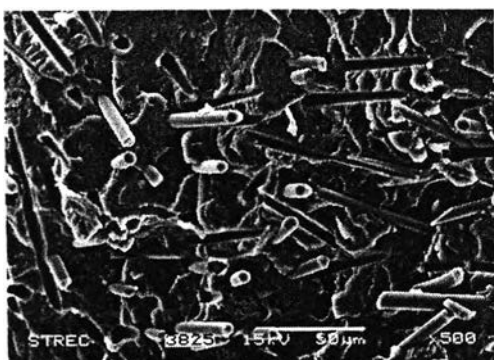


ข)

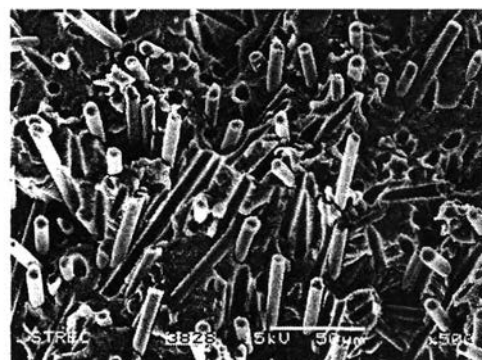
รูปที่ 4.3 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์ กำลังขยาย 500 เท่า :
 ก) แกรไฟต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และ ข) แกรไฟต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

4.2.1.3 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน

โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าเส้นใยคาร์บอนมีลักษณะการเรียงตัวและการกระจายตัวของเส้นใยไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ยังพบว่าผิวของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีลักษณะเป็นรูทังนี้เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนบางส่วนหลุดออกไป เมื่อปริมาณของเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของเส้นใยคาร์บอนเห็นเด่นชัดขึ้น และเส้นใยคาร์บอนอยู่ใกล้กันหรือสัมผัสกันมากขึ้นเป็นผลให้ระยะห่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนกับพอลิพรอพิลีนและระยะห่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนด้วยกันเองลดลง โดยพฤติกรรมดังกล่าวจะเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อพอลิเมอร์คอมโพสิตมีปริมาณเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.4 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน กำลังขยาย 500 เท่า : ก) เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ข) เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และ ค) เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

4.2.2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน

โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าการผสมเส้นใยคาร์บอนที่มีร้อยละโดยน้ำหนักแตกต่างกันเข้ากับอะเซทิลีนแบล็คปริมาณคงที่จะมองเห็นเฉพาะเส้นใยคาร์บอน แต่ไม่สามารถมองเห็นอะเซทิลีนแบล็คทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยคาร์บอนมีขนาดใหญ่กว่าอะเซทิลีนแบล็ค (จากตารางที่ 4.1) ทำให้เส้นใยคาร์บอนบดบังอนุภาคของอะเซทิลีนแบล็ค และพบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้นการกระจายตัวของเส้นใยคาร์บอนในพอลิพรอพิลีนจะกระจายตัวได้มากขึ้นและเส้นใยคาร์บอนสัมผัสกันมากขึ้น อย่างไรก็ตามอะเซทิลีนแบล็คซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยคาร์บอนจะกระจายตัวและแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนกับพอลิพรอพิลีน ทำให้อนุภาคของอะเซทิลีนแบล็คมีโอกาสสัมผัสกับเส้นใยคาร์บอนด้วย ส่งผลให้เกิดเครือข่ายต่อเนื่องได้มากขึ้น

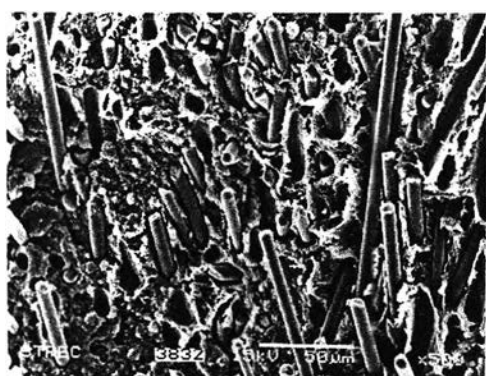
4.3 การศึกษาการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียวคือ พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค พอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์และพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน รวมถึงพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนที่มีร้อยละแตกต่างกันโดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้น พอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าการนำไฟฟ้า 10^{-13} ซีเมนส์/เซนติเมตร

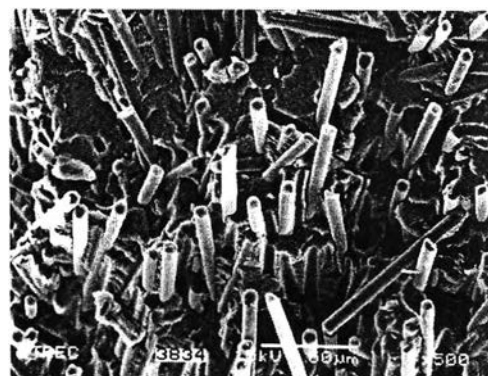
4.3.1 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งชนิดเดียวได้แก่ พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค พอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์และพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กๆ แต่กระจายตัวอยู่ทั่วไปในพอลิพรอพิลีน ทำให้เกิดการสัมผัสกันเองได้มากขึ้น อีกทั้งระยะห่างระหว่างสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้ากับพอลิพรอพิลีนและระยะห่างระหว่างสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าด้วยกันเองลดลงเป็นผลให้เกิดเครือข่ายต่อเนื่อง (Continuous network

structure) ของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าทำให้เส้นทางการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นหรือเคลื่อนที่ได้ต่อเนื่องตลอดโครงสร้างของพอลิเมอร์คอมโพสิตดังกล่าว โครงสร้างพื้นฐานวิทยาที่แสดงในรูป 4.2-4.4 ดังนั้นการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuan และคณะ [3] พบว่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นแบบคอมโพสิตจะลดลงเมื่อปริมาณของแกรไฟต์เพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 2000 มิลลิโอม เป็น 5.8 มิลลิโอม เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มจากร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก Koncar และคณะ [29] พบว่าเมื่อปริมาณของ



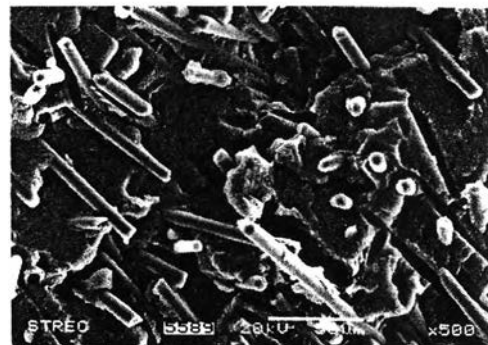
ก)



ข)



ค)



ง)

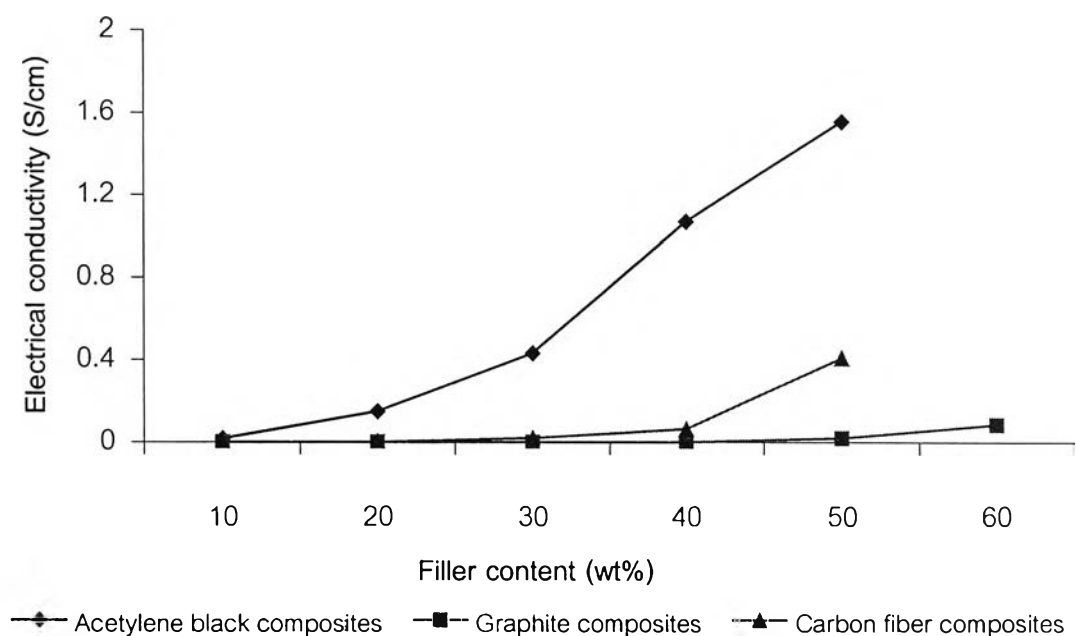
รูปที่ 4.5 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน กำลังขยาย 500 เท่า : ก) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก + เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ข) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก + เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ค) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก + เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และ ง) อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก + เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

แกรไฟต์ลดลง ในขณะที่ปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการนำไฟฟ้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าลดลงเนื่องจากปริมาณของแกรไฟต์ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าลดลง อีกทั้งซิลิกาซึ่งมีสมบัติไม่นำไฟฟ้าและเป็นสารทำให้เปียก (Wetting agent) เป็นผลให้ความต้านทานหน้าสัมผัสและความต้านทานภายใน (Internal resistance) ของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลง Taipalus และคณะ [33] พบว่าการนำไฟฟ้าของเส้นใยคาร์บอนชนิดสั้นเพิ่มจาก 10^{-13} ซีเมนส์/เซนติเมตร เป็น 10^{-4} ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อปริมาณของเส้นใยคาร์บอนเพิ่มจากร้อยละ 4.2 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 6.6 โดยปริมาตร

เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสารเติมแต่งต่างชนิดกันพบว่า พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนและของแกรไฟต์ตามลำดับ แต่จากตารางที่ 4.1 พบว่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอะเซทิลีนแบล็คสูงกว่าเส้นใยคาร์บอน ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับพอลิพรอพิลีน การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนควรจะสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค สาเหตุที่พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีการนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนอาจเนื่องจากอะเซทิลีนแบล็คมีขนาดเล็กกว่าสามารถกระจายตัวเข้าไปในเนื้อของพอลิพรอพิลีนได้ดีกว่าและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้เกิดเป็นเฟสต่อเนื่องได้ดีกว่าการกระจายตัวของเส้นใยคาร์บอน (รูปที่ 4.2 และ 4.4) ทำให้เส้นทางการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีมากกว่า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงเกิดอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คจึงสูงกว่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คและพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนทั้งนี้เป็ผลมาจากแกรไฟต์ที่ใช้มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์ (รูปที่ 4.3) โดยเนื้อของพอลิเมอร์คอมโพสิตเกิดความไม่ต่อเนื่อง ทำให้การนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมโพสิตเกิดความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คและพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน

ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้อะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณของอะเซทิลีนแบล็คที่น้อยที่สุดที่ทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Percolation threshold โดยมีค่าการนำไฟฟ้า 0.148 ซีเมนส์/เซนติเมตร และเมื่อปริมาณของอะเซทิลีนแบล็คเพิ่มเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเป็น 1.592 ซีเมนส์/เซนติเมตร สำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนร้อยละ

40 โดยน้ำหนัก (0.062 ซีเมนส์/เซนติเมตร) และเมื่อเส้นใยคาร์บอนเพิ่มเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 0.408 ซีเมนส์/เซนติเมตร ส่วนพอลิเมอร์คอมโพสิตของแกรไฟต์ มีค่าการนำไฟฟ้าไม่แตกต่างกันมากเมื่อปริมาณของแกรไฟต์เพิ่มขึ้น โดยการนำไฟฟ้ามีค่า 0.087 ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อใช้แกรไฟต์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก

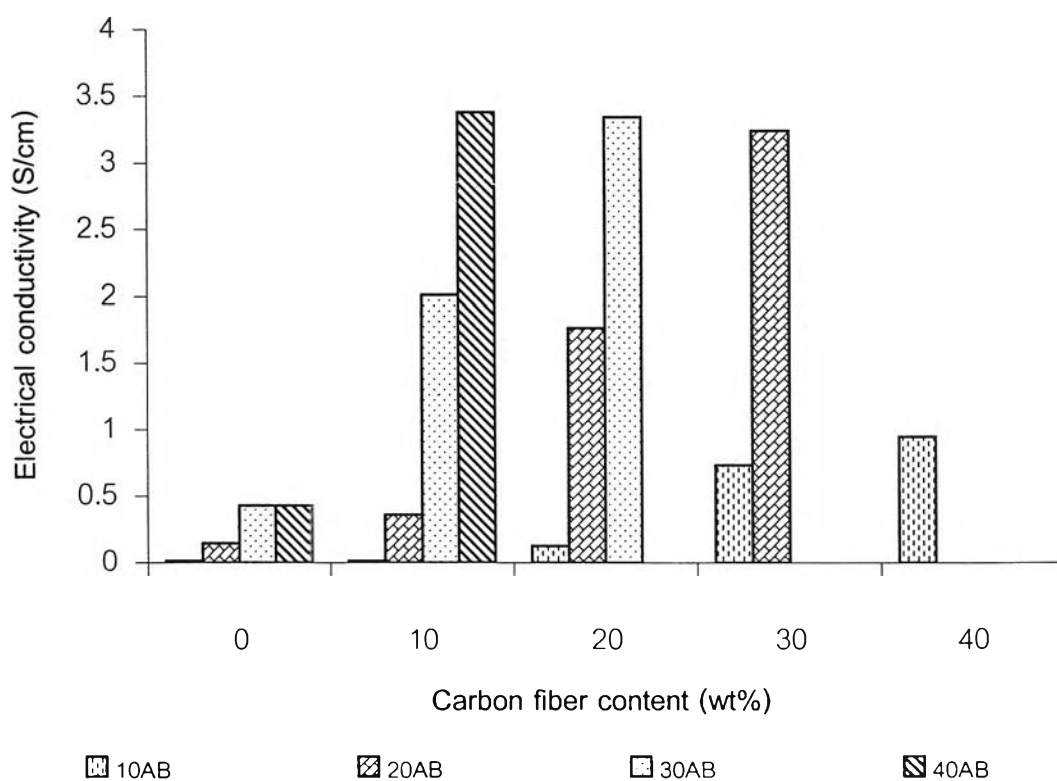


รูปที่ 4.6 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

4.3.2 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน

จากการศึกษาการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว พบว่าสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าที่ทำให้การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้นคือ แกรไฟต์ เส้นใยคาร์บอนและอะเซทิลีนแบล็ค ตามลำดับ เนื่องจากแกรไฟต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตค่อนข้างต่ำ ดังนั้นสารเติมแต่งที่นำสนใจนำมาทำพอลิเมอร์คอมโพสิตของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันคือ อะเซทิลีนแบล็คและเส้นใยคาร์บอน โดยค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมเส้นใยคาร์บอนร่วมกับอะเซทิลีนแบล็คจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าในกรณีที่ไม่เติมเส้นใยคาร์บอนและค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยปริมาณของอะเซทิลีนแบล็คคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีโอกาสสัมผัสกันเองและเกิดการสัมผัสกันระหว่างเส้นใยคาร์บอน

กับอะเซทิลีนแบล็ค (รูปที่ 4.5) เป็นผลให้ระยะห่างระหว่างสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดลดลง ทำให้เส้นทางการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ต่อเนื่องตลอดเนื้อของพอลิเมอร์คอมโพสิต ดังนั้นการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thongruang และคณะ [32] พบว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนในคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแกรไฟต์ เป็นการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้า โดยการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ซีเมนส์/เซนติเมตร ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของแกรไฟต์และประมาณ 5 ซีเมนส์/เซนติเมตร ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของเส้นใยคาร์บอน เป็น 18 ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อนำแกรไฟต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักผสมกับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ทั้งนี้เป็นผลจากระยะห่างระหว่างอนุภาคของสารเติมแต่งลดลง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง (High electron densities) ส่งผลให้การนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.7 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้พบว่า พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าการใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพียงชนิดเดียว และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดประมาณ 3.3 ซีเมนส์/เซนติเมตร คือพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าการนำไฟฟ้าเป็น 3.242, 3.347 และ 3.384 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 การนำไฟฟ้าของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นแบบคอมโพสิต

พอลิเมอร์เมตริกซ์	สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า	ปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	การนำไฟฟ้า (ซีเมนส์/เซนติเมตร)	เอกสารอ้างอิง
อีพ็อกซี	แกรไฟต์	70.00	10~30	38
พีนอลลิเกรซิน	แกรไฟต์	77.50	53	29
ฟลูออโรพอลิเมอร์	แกรไฟต์	74.00	119	39
ฟลูออโรพอลิเมอร์	แกรไฟต์+ เส้นใยคาร์บอน	74.00	109	40
ไวนิลเอสเทอร์	แกรไฟต์	68.00	85	41
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	แกรไฟต์+ เส้นใยคาร์บอน	60	18	32
เทอร์โมพลาสติก	แกรไฟต์ + เส้นใยคาร์บอน/ เส้นใยแก้ว	65.00	230-260	42
พอลิพรอพิลีน	อะเซทิลีนแบล็ค+ เส้นใยคาร์บอน	50	~ 3.3	งานวิจัยนี้

เมื่อเปรียบเทียบการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้กับงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่น้อยกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจาก

- ชนิดของเมตริกซ์ที่ใช้น่าจะมีผลให้ค่าการนำไฟฟ้าต่างกันกล่าวคือ พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมาใช้น้ำพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่มีสภาพความมีขั้วซึ่งอาจไปเสริมให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น ในขณะที่งานวิจัยนี้ใช้พอลิพรอพิลีนที่ไม่มีสภาพความมีขั้ว

- ปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าที่เติมลงไปแตกต่างกัน ในงานวิจัยที่ผ่านมาเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเครื่องผสมภายใน (Internal mixer) ซึ่งโอกาสที่สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าจะผสมเข้ากับพอลิเมอร์นั้นมีมากกว่า นอกจากนั้นสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้ายังไม่เกิดการสูญหายขณะทำการผสม แต่ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งซึ่งเป็นเครื่องผสมภายนอก (External mixer) สามารถผสมได้มากที่สุดเมื่อใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักผสมกับพอลิพรอพิลีนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ถ้าลดปริมาณของพอลิพรอพิลีนลงแล้วเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะไม่สามารถผสมเข้ากันได้

- ชนิดของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าที่ใช้ เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมาใช้น้ำแกรไฟต์ซึ่งอาจมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าอะเซทีลีนแบล็คและเส้นใยคาร์บอนที่ใช้มีสมบัติต่างกันด้วย

แต่เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cho และคณะ [28] แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า การนำไฟฟ้าของคอมโพสิตในงานวิจัยของ Cho และคณะมีค่าต่ำกว่าของงานวิจัยนี้ แต่สามารถนำไปใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง โดยพบว่าสามารถทำงานได้นานถึง 500 ชั่วโมง โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) 0.9-1.0 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ดังนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้น่าไปใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วได้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต

	พอลิเมอร์คอมโพสิต ในงานวิจัยนี้	พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ เตรียมโดย Chc และคณะ [28]	
		คอมโพสิตเอ	คอมโพสิตบี
การนำไฟฟ้า (ซีเมนส์/เซนติเมตร)	~ 3.3	0.008	0.007

4.4 สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

ในการศึกษาสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจะเน้นที่การนำไฟฟ้าเป็นหลัก พบว่าการใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทีลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนให้ค่าการนำไฟฟ้าดีกว่าการใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ดังนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตที่จะนำไปศึกษาสมบัติต่อไป คือพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทีลีนแบล็ค พอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน

และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน โดยสมบัติที่ต้องการศึกษาคือ ความหนาแน่น การดูดซับน้ำ ความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้น

4.4.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต

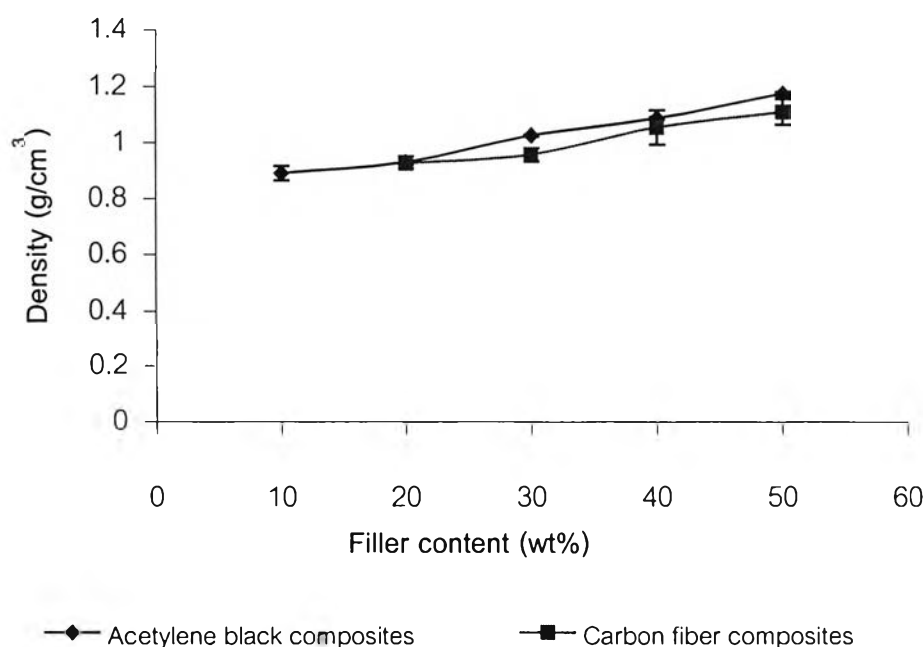
การนำพอลิเมอร์คอมโพสิตไปประยุกต์ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นนอกจากพิจารณาราคาของวัสดุแล้วยังพิจารณาถึงน้ำหนักด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์เชื้อเพลิงมีน้ำหนักมากเกินไป ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดให้แผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นมาตรฐานมีความหนาแน่นน้อยกว่า 5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร [11, 28, 43]

4.4.1.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

งานวิจัยนี้หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยนำชิ้นงานที่มีขนาดที่แน่นอนไปชั่งน้ำหนักแล้วหาความหนาแน่นจากสมการที่ 3.1 พบว่าพอลิพรอพิลีนมีความหนาแน่น 0.883 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่พอลิพรอพิลีนทั่วไปมีความหนาแน่น 0.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร [20] ความหนาแน่นของพอลิพรอพิลีนในงานวิจัยนี้แตกต่างจากความหนาแน่นของพอลิพรอพิลีนที่แท้จริงร้อยละ 1.91 ซึ่งพบว่ามีค่าแตกต่างที่น้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการที่ 3.1 หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้

ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียวแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าที่เติมเข้าไปจะแทรกหรือกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนส่งผลให้ความหนาแน่นของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีความหนาแน่นสูงกว่าของเส้นใยคาร์บอนเล็กน้อยโดยเฉพาะที่ร้อยละ โดยน้ำหนักของสารเติมแต่งสูงๆ แต่ความจริงควรจะมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า เนื่องจากความหนาแน่นของอะเซทิลีนแบล็คมีค่าต่ำกว่าเส้นใยคาร์บอน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากอะเซทิลีนแบล็คซึ่งมีขนาดเล็กมากสามารถแทรกหรือกระจายตัวเข้าไปในเนื้อพอลิพรอพิลีนได้ดีกว่า ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่า (รูปที่ 4.2) ในขณะที่เส้นใยคาร์บอนมีขนาดใหญ่ การแทรกตัวเข้าไปในเนื้อพอลิพรอพิลีนได้น้อยกว่า โดยจะเกิดการแทนที่ปริมาตรเนื้อพอลิพรอพิลีนแทน ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีความหนาแน่นสูงกว่า โดยความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คอยู่ในช่วง 0.890 – 1.173 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

พอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.926 – 1.109 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

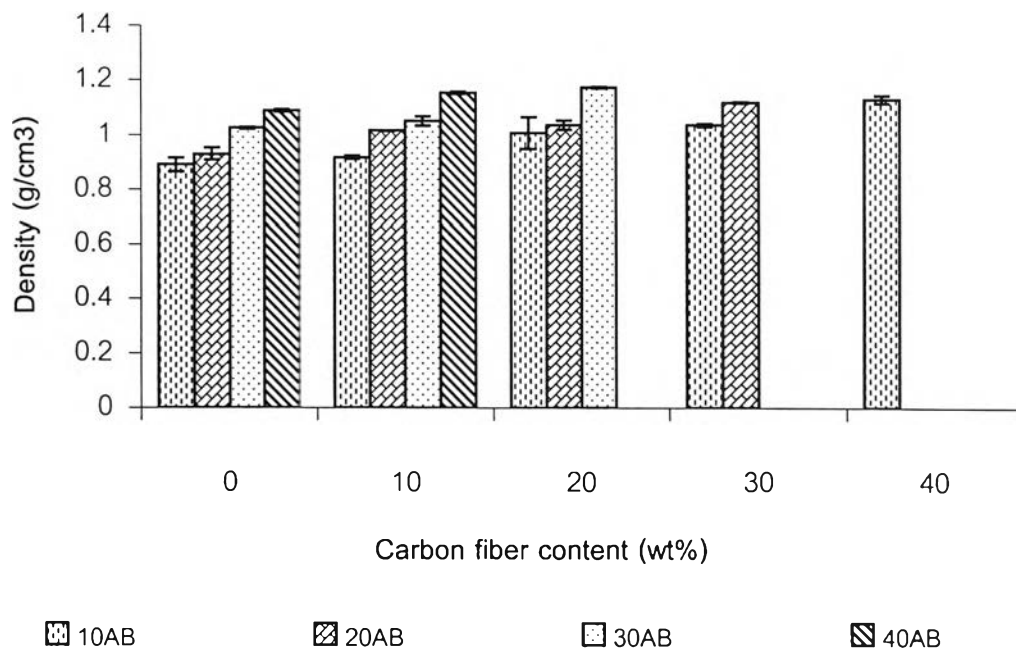


รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

4.4.1.2 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน

ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนมีความหนาแน่นสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพียงตัวเดียว ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อนำเส้นใยคาร์บอนที่แตกต่างกันโดยน้ำหนักผสมกับอะเซทิลีนแบล็คที่มีน้ำหนักคงที่ โดยความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนมีค่า 0.917 – 1.153 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ในงานวิจัยนี้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตทั้ง 2 ชนิดมีค่าน้อยกว่า 1.2 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว ดังนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้เป็นทางเลือกหนึ่งในการนำไปทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว



รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน

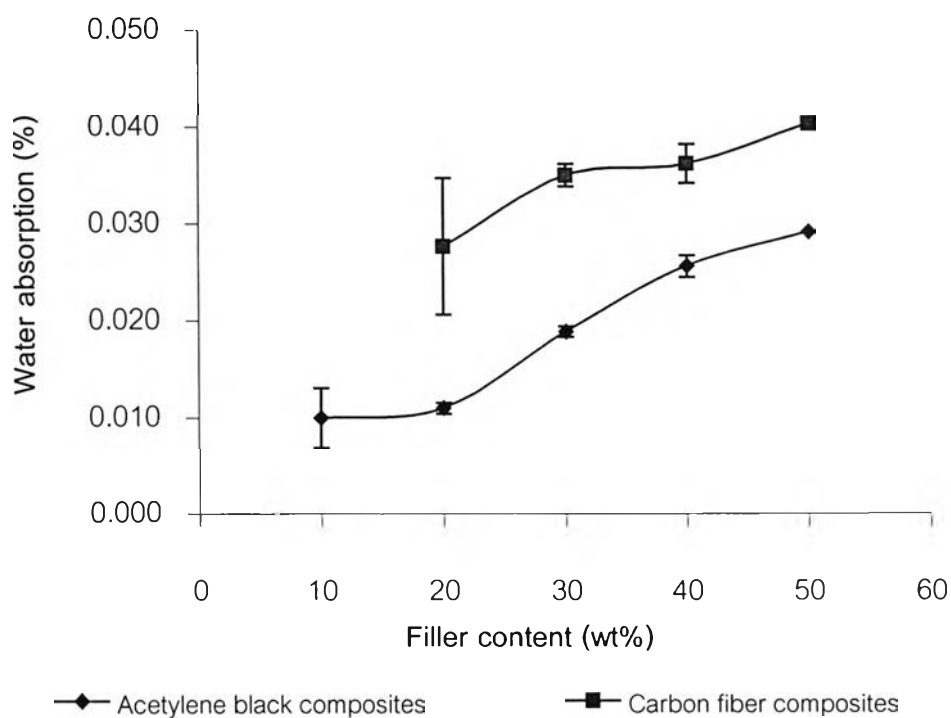
4.4.2 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิต

การนำพอลิเมอร์คอมโพสิตไปประยุกต์ใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นวัสดุที่ใช้ต้องมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยมากหรือไม่ดูดซับน้ำเลย ทั้งนี้หากวัสดุที่เลือกใช้สามารถดูดซับน้ำได้มากเมื่อนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจะทำให้น้ำท่วมเซลล์ทางด้านขั้วแคโทดซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าตก ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานการดูดซับน้ำของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นโดยต้องมีค่าการดูดซับน้ำน้อยกว่าร้อยละ 0.3 [11, 28, 43]

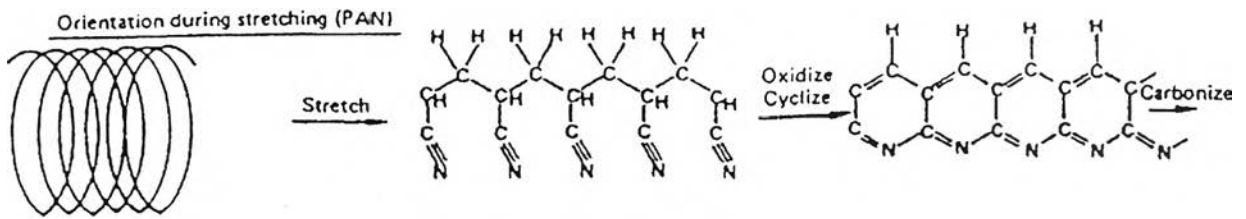
4.4.2.1 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

ผลการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียวแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและมากกว่าค่าการดูดซับน้ำของพอลิพรอพิลีน (ร้อยละ 0.008) โดยพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนดูดซับน้ำได้ดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค ทั้งนี้

เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.11 มีหมู่ฟังก์ชันของ ไนโตรเจน-คาร์บอน ซึ่งเป็นพันธะที่มีขั้วเช่นเดียวกับน้ำ ดังนั้นจึงสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุลของน้ำได้ทำให้เส้นใยคาร์บอนสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าอะเซทิลีนแบล็ค ซึ่งโครงสร้างของอะเซทิลีนแบล็คนี้ไม่มีสมบัติความมีขั้ว แต่อะเซทิลีนแบล็คมีลักษณะเป็นปุย (รูปที่ 4.1-ก) และมีรูพรุนขนาด 0.015-0.1 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.1) ซึ่งโมเลกุลของน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนได้ ดังนั้นอะเซทิลีนแบล็คจึงสามารถดูดซับน้ำได้บ้าง และเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของไนโตรเจน-คาร์บอน ของเส้นใยคาร์บอน อีกทั้งเป็นการเพิ่มปริมาณรูพรุนของอะเซทิลีนแบล็คด้วย ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับเส้นใยคาร์บอนได้มากขึ้น และโมเลกุลของน้ำเกิดการซึมผ่านเข้าไปในรูพรุนของอะเซทิลีนแบล็คได้มากขึ้น ส่งผลให้การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.028 - 0.040 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.010 - 0.029



รูปที่ 4.10 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

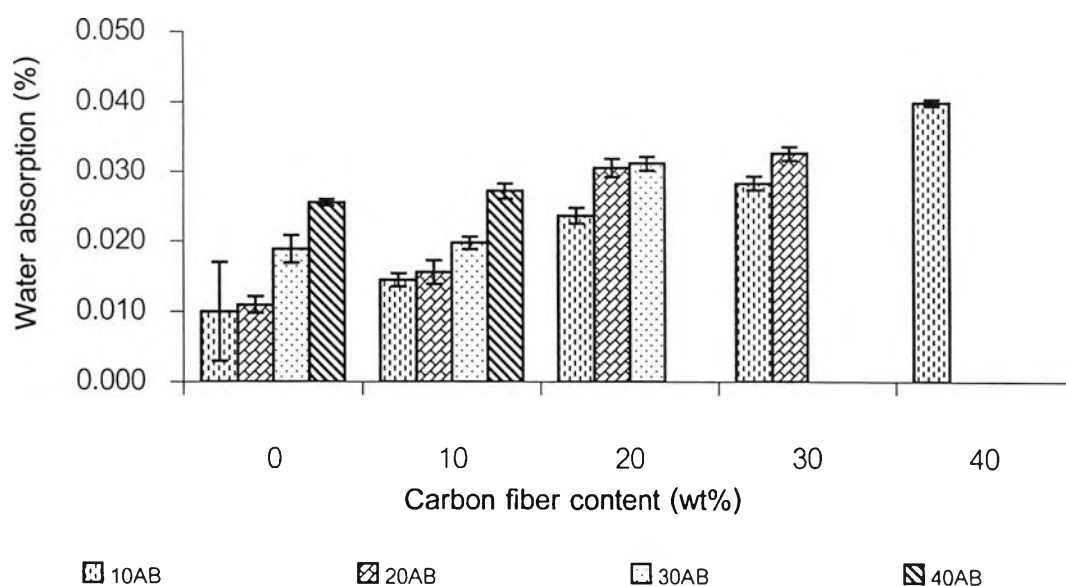


รูปที่ 4.11 โครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน [19]

4.4.2.2 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน

การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คและเส้นใยคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนมีค่าสูงกว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีหมู่ฟังก์ชันของไนโตรเจน-คาร์บอน ซึ่งมีความเป็นขั้วสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับน้ำ และอะเซทิลีนแบล็คมีความเป็นรูพรุน น้ำมีโอกาสแทรกตัวและถูกดูดซับอยู่ในรูพรุนได้ จากพฤติกรรมดังกล่าวนี้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าทั้งสองชนิดนี้ต่างก็ช่วยกันดูดซับน้ำ ดังนั้นการดูดซับน้ำจึงสูงกว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพียงชนิดเดียว โดยการดูดซับน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยคาร์บอนผสมกับอะเซทิลีนแบล็คที่มีปริมาณคงที่ เนื่องจากปริมาณของเส้นใยคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลให้หมู่ฟังก์ชันของไนโตรเจน-คาร์บอน เพิ่มขึ้นด้วย การเกิดแรงกระทำกับโมเลกุลของน้ำมากขึ้นทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตดูดซับน้ำได้มากขึ้น การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตนี้มีค่าในช่วงร้อยละ 0.015 – 0.040

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียวและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันกับเกณฑ์การดูดซับน้ำมาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.3 พบว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้ให้ค่าต่ำกว่าการดูดซับน้ำมาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วมาตรฐาน ดังนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วได้



รูปที่ 4.12 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน

4.4.3 ความโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิต

การนำพอลิเมอร์คอมโพสิตไปประยุกต์ใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นนั้นบางครั้งทำให้เกิดการโค้งงอเนื่องจากการเซาะร่องและการไปประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) โดยความแข็งแรงโค้งงอมาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นมีค่ามากกว่า 50 เมกะพาสคัล [11, 28, 43]

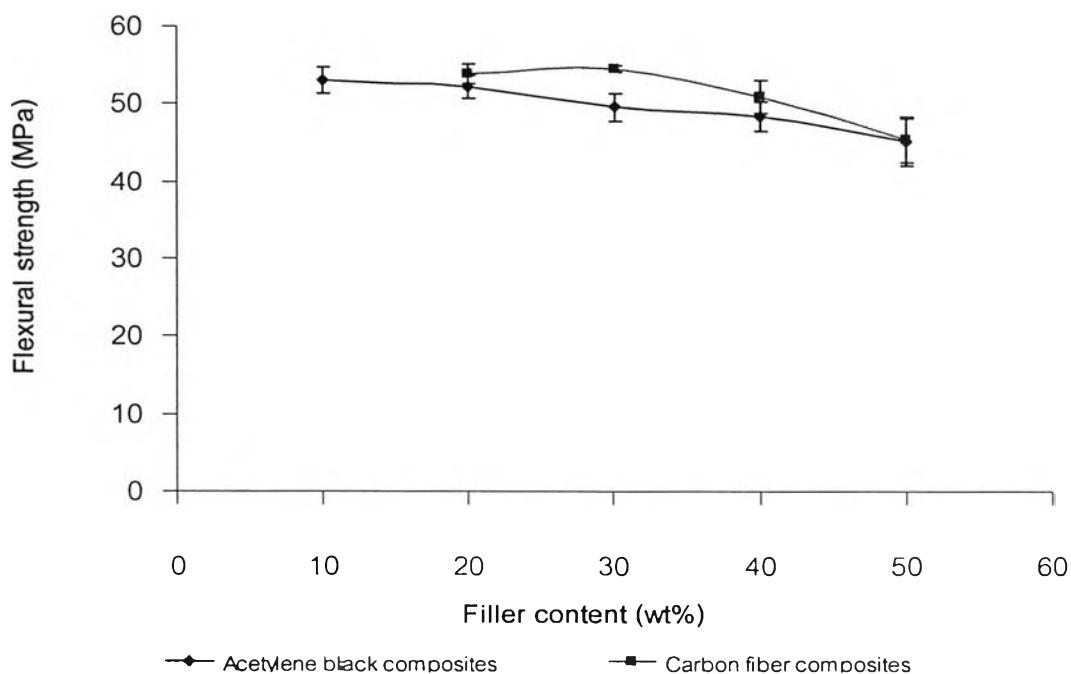
4.4.3.1 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียวมีค่ามากกว่าของพอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (42.41 เมกะพาสคัล) เมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง (รูปที่ 4.13) เนื่องจากเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าสามารถกระจายตัวเข้าไปในพอลิพรอพิลีนได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและเกิดการสัมผัสกันได้มากขึ้นทำให้ช่องว่างระหว่างสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าลดลง (รูปที่ 4.2 และ 4.4) เป็นผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้ากับพอลิพรอพิลีนลดลงด้วย ดังนั้น

เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจึงถ่ายเทแรงจากพอลิพรอพิลีนไปยังสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าได้น้อยมาก ส่งผลให้พลังงานเกิดการสะสมที่พอลิพรอพิลีน พอลิเมอร์คอมโพสิตจึงทนต่อความแข็งแรงโค้งงอได้น้อยลงเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติแข็งแต่เปราะ นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค ทั้งนี้เนื่องจากอะเซทิลีนแบล็คเป็นอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็กมากอีกทั้งมีพื้นผิวสัมผัสที่สูงกว่า (218 ตารางเมตร/กรัม) การกระจายตัวเข้าไปในพอลิพรอพิลีนจึงดีกว่าและเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้มากขึ้นช่องว่างระหว่างอะเซทิลีนแบล็คจึงลดลง (รูปที่ 4.2) การยึดเกาะกันระหว่างผิวหน้าของอะเซทิลีนแบล็คกับพอลิพรอพิลีนลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกพลังงานที่เกิดขึ้นจึงสะสมอยู่ที่พอลิพรอพิลีนทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คทนต่อความแข็งแรงโค้งงอได้น้อย ในขณะที่เส้นใยคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นใยซึ่งมีพื้นผิว 0.99 ตารางเมตร/กรัม และมีความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูงกว่าอนุภาคทรงกลม [44] เมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงสามารถเกิดการเกี่ยวพันกันของเส้นใยและสัมผัสกันได้มากขึ้นช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนจึงลดลง (รูปที่ 4.4) รวมทั้งความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง [45] การกระจายตัวของเส้นใยคาร์บอนในพอลิพรอพิลีนจึงดีไม่เท่ากับอะเซทิลีนแบล็คซึ่งมีอนุภาคเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็ก การยึดเกาะกันระหว่างผิวหน้าของเส้นใยคาร์บอนกับพอลิพรอพิลีนลดลงด้วยแต่อาจมากกว่าการยึดเกาะกันระหว่างผิวหน้าของอะเซทิลีนแบล็คกับพอลิพรอพิลีน ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจึงสามารถถ่ายโอนแรงจากพอลิพรอพิลีนไปยังเส้นใยคาร์บอนได้บ้าง ส่งผลให้ทนต่อความแข็งแรงโค้งงอได้มากกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค โดยความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีค่าอยู่ในช่วง 45.11 - 53.20 เมกะพาสคัล ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนมีค่าอยู่ในช่วง 45.49 - 53.84 เมกะพาสคัล

ผลการทดลองความแข็งแรงโค้งงอในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuan และคณะ [3] ซึ่งพบว่าความแข็งแรงโค้งงอของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นแบบคอมโพสิตลดลงจาก 38.47 เมกะพาสคัล เป็น 27.3 เมกะพาสคัล เมื่อปริมาณของแกรไฟต์เพิ่มจากร้อยละ 60 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเรซินกับแกรไฟต์อ่อนลง Lopez และคณะ [45] พบว่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตของคาร์บอนนาโนทิวผนังเดี่ยว (Single-wall nanotubes) มีความแข็งแรงโค้งงอมากกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของคาร์บอนแบล็ค เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวผนังเดี่ยวมีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กๆ ในขณะที่คาร์บอนแบล็คมีลักษณะเป็นอนุภาคซึ่งทำให้ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสารเติมแต่งทั้งสองแตกต่างกัน คาร์บอนนาโนทิวผนังเดี่ยวจึงเกิดการเกี่ยวพันกันและเชื่อมต่อระหว่างกันได้ดีกว่าคาร์บอนแบล็ค

อย่างไรก็ตามความแข็งแรงโค้งงอของคาร์บอนนาโนทิวผนังเดี่ยวจะลดลงเมื่อมีคาร์บอนนาโนทิวผนังเดี่ยวในพอลิเมอร์คอมโพสิตมากที่สุดคือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเกิดการเกี่ยวพันและเกิดการรวมตัวกันสูงทำให้แรงยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าลดลง



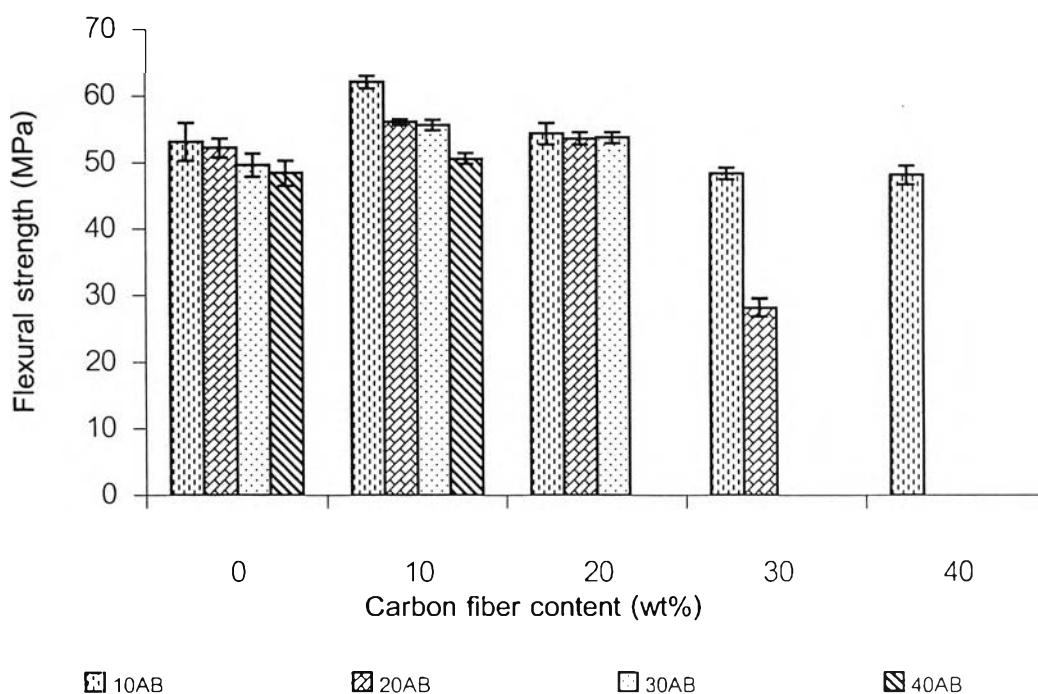
รูปที่ 4.13 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

4.4.3.2 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน

ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คและเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อนำเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักผสมกับอะเซทิลีนแบล็คที่ร้อยละโดยน้ำหนักค่าต่างๆ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยคาร์บอนความแข็งแรงโค้งงอค่อยๆลดลง เนื่องจากเกิดการเกี่ยวพันกันและเกิดการสัมผัสกันของเส้นใย อีกทั้งยังเกิดการรวมตัวกันเองระหว่างอะเซทิลีนแบล็คและเกิดการสัมผัสกันของเส้นใยคาร์บอนและระหว่างอะเซทิลีนแบล็คทำให้ช่องว่างระหว่างสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าลดลง (รูปที่ 4.5) การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าลดลงด้วย นอกจากนี้ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าลดลงเช่นกัน [45] ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะ

เกิดการสะสมพลังงานอยู่ที่พอลิพรอพิลีนทำให้สามารถทนต่อความแข็งแรงโค้งงอได้น้อยลง ความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อนำเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักผสมกับ ระหว่างอะเซทิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงเป็น 28.30 เมกะพาสคัล

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า ชนิดเดียวกับเกณฑ์ความแข็งแรงโค้งงอมาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้น (มากกว่า 50 เมกะพาสคัล) พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คให้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานเมื่อใช้ อะเซทิลีนแบล็คตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป และพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนให้ ค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบ ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกับกับ ความแข็งแรงโค้งงอมาตรฐานพบว่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงโค้งงอมาตรฐานยกเว้น พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าของอะเซทิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กับเส้นใย คาร์บอนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้บางสูตร สามารถนำไปใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นได้



รูปที่ 4.14 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกับระหว่าง อะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน

4.4.4 ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิต

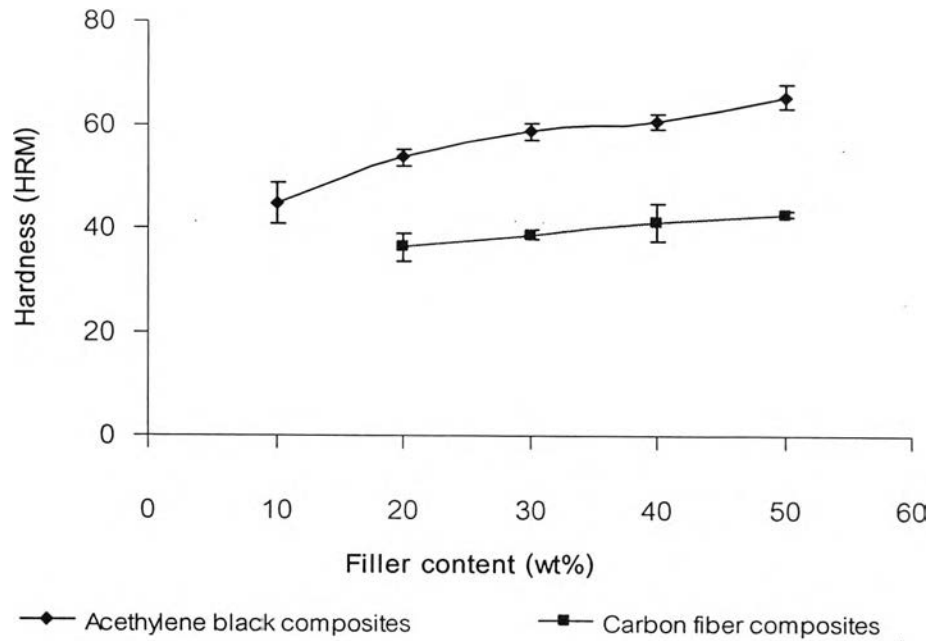
การนำพอลิเมอร์คอมโพสิตไปประยุกต์ใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นนั้น บางครั้งต้องพิจารณารอง ดังนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่ควรมีความแข็งแรงมากเกินไปเพื่อให้สามารถพิจารณารองได้ ความแข็งแรงมาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นไม่มีรายงานอ้างอิงค่า

4.4.4.1 ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว

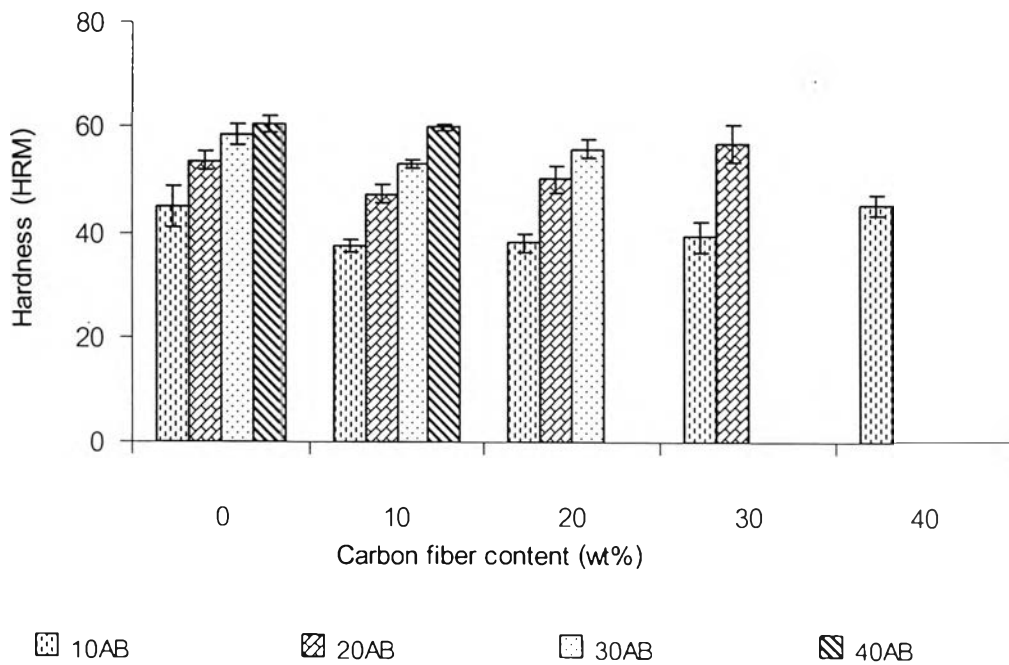
งานวิจัยนี้ทดสอบความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตแบบ Rockwell สเกล M พบว่าพอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแข็งแรง 18.62 HRM ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียวแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นการกระจายตัวในพอลิพรอพิลีนมีมากขึ้น อีกทั้งมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและสัมผัสกันได้มากขึ้น (รูปที่ 4.2 และ 4.4) ดังนั้นจึงสามารถต้านทานแรงกดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ดังนั้นจึงต้านทานต่อแรงกดได้น้อยกว่า โดยพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 44.80 – 65.34 HRM และพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 36.22 – 42.64 HRM

4.4.4.2 ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกัน

ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะลดลง จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นโดยมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนไปลดความต้านทานต่อแรงกด ดังนั้นความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงลดลง



รูปที่ 4.15 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว



รูปที่ 4.16 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอน

4.5 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

เนื่องจากพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้ยังมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ การทดลองต่อไปจึงเป็นการหาสารเติมแต่งอื่นๆ มาผสมเพื่อปรับปรุงการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยจากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (20AB+30CF) พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (30AB+20CF) และพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (40AB+10CF) แต่เมื่อพิจารณาความหนาแน่น การดูดซับน้ำและความแข็งแรงโค้งงอเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ให้ค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานคือ พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมกันระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนกับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว

สมบัติ	พอลิเมอร์คอมโพสิต			
	20AB+30CF	30AB+20CF	40AB+10CF	เกณฑ์มาตรฐาน
การนำไฟฟ้า (ซีเมนส์/เซนติเมตร)	3.242± 0.006	3.348± 0.007	3.384± 0.015	10 *
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.160± 0.003	1.171± 0.003	1.153± 0.005	< 5 **
การดูดซับน้ำ (ร้อยละ)	0.033± 0.000	0.031± 0.000	0.027± 0.001	< 0.3 **
ความแข็งแรงโค้งงอ (เมกะพาสคัล)	28.298± 1.327	53.779± 0.841	50.574± 0.826	> 50 **

* จากรายการอ้างอิงที่ 46

** จากรายการอ้างอิงที่ 11 และ 43

แต่เมื่อพิจารณาราคาของวัตถุดิบที่ใช้และราคาของพอลิเมอร์คอมโพสิตในการเตรียมหนึ่งกิโลกรัมแสดงดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ พบว่าการใช้เส้นใยคาร์บอนในปริมาณที่น้อยทำให้ต้นทุนในการผลิตถูกลง ดังนั้นจึงเลือกพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ

40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เพื่อนำมาเติมสารเติมแต่งแล้วศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

ตารางที่ 4.5 ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

วัตถุดิบ	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	บริษัท
พอลิพรอพิลีน	40	อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัดมหาชน (TPI)
อะเซทิลีนแบล็ค	61	อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัดมหาชน (TPI)
เส้นใยคาร์บอน	~3,625	Asbury Graphite Mill., Inc

ตารางที่ 4.6 ราคาในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้หนึ่งกิโลกรัม

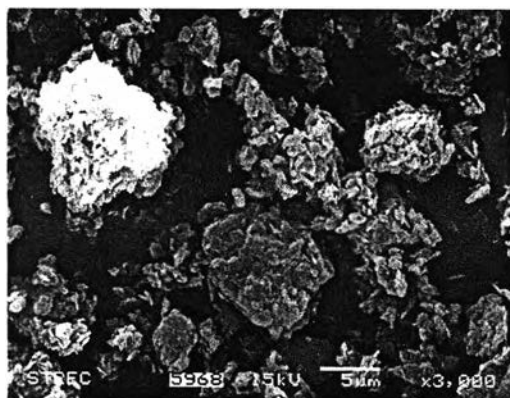
ปริมาณของวัตถุดิบในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต (กรัม)			ราคาของพอลิเมอร์คอมโพสิต 1 กิโลกรัม (รวมภาษี)
อะเซทิลีนแบล็ค	เส้นใยคาร์บอน	พอลิพรอพิลีน	
20	30	50	1198
30	20	50	817
40	10	50	435

สารเติมแต่งที่เลือกมาเติมในพอลิเมอร์คอมโพสิตคือ ซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) เนื่องจากซิงค์สเตียเรทมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่น ทำให้ไม่เกิดการเกาะติดกับลูกกลิ้ง อีกทั้งทำให้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าผสมเข้ากับพอลิพรอพิลีนได้ดีขึ้น ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นเป็นสารให้สี นอกจากนั้นยังมีสมบัติกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งทำให้สีของพอลิเมอร์คอมโพสิตเปลี่ยนไปรวมถึงการนำไฟฟ้าและสมบัติอื่นๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นด้วย

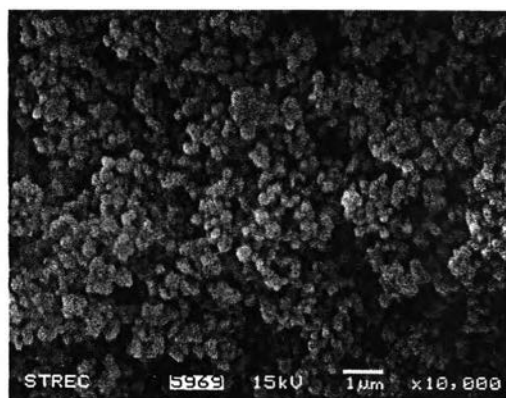
4.5.1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของสารเติมแต่งและพอลิเมอร์คอมโพสิต

จากรูปที่ 4.17 พบว่าโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของซิงค์สเตียเรทเป็นลิ้ม พื้นผิวไม่เรียบ ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นทรงกลมจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อพิจารณาขนาดของสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด กล่าวได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กกว่าซิงค์สเตียเรท และจากการศึกษา

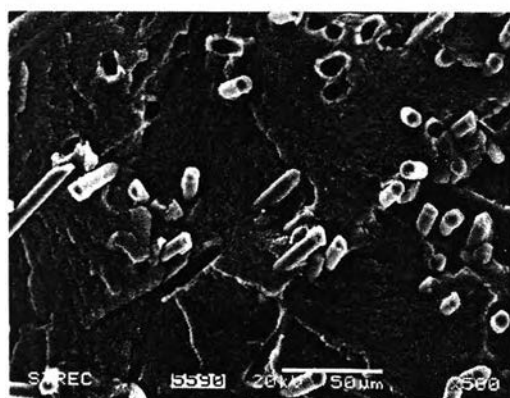
โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่า มีการหลุดออกของเส้นใยคาร์บอน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยคาร์บอนนั้นมีน้อย ในขณะที่ลักษณะการหลุดออกของอะเซทิลีนแบล็คกับพอลิพรอพิลีนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ เนื่องจากอะเซทิลีนแบล็คมีขนาดเล็กมาก



ก)



ข)



ค)

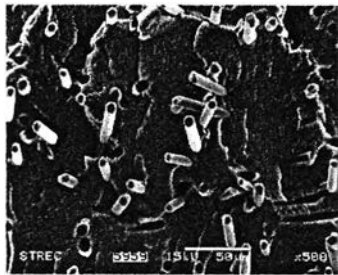
รูปที่ 4.17 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของสารเติมแต่งและพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็ค ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก : ก) ซิงค์สเดียวเรท กำลังขยาย 3,000 เท่า ข) โทเทเนียมไดออกไซด์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ ค) พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 500 เท่า

4.5.2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่ง

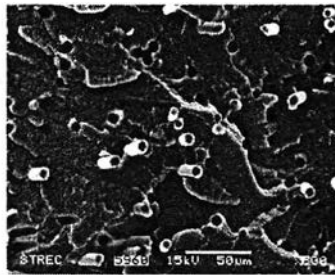
จากรูปที่ 4.18 พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมซิงค์สเตียเรทและไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันมีโครงสร้างพื้นฐานวิทยาไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากสารเติมแต่งที่ใช้มีขนาดเล็กมากไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้คาดว่าสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ไปแทรกตัวหรือกระจายตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้ากับพอลิพรอพิลีนและช่องว่างระหว่างสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าด้วยกันเอง ทำให้เกิดการสัมผัสกันมากขึ้นของทั้งสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าและสารเติมแต่งที่เติมเข้าไป เป็นผลให้เกิดเครือข่ายต่อเนื่องได้มากขึ้น ส่งผลให้เส้นทางการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างพื้นฐานวิทยากับพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนเติมสารเติมแต่ง (รูปที่ 4.17-ค) พบว่า โครงสร้างพื้นฐานวิทยาไม่ต่างกัน อีกทั้งไม่มีความแตกต่างของสีของพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนและหลังเติมสารเติมแต่ง

4.5.3 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต

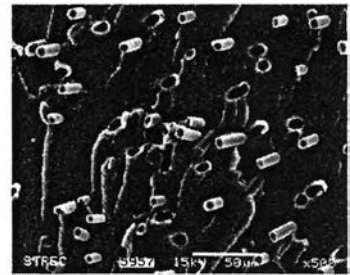
การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่งแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าการเติมซิงค์สเตียเรทที่ต่างกันโดยน้ำหนักร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีน้ำหนักคงที่ ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิงค์สเตียเรทและไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าและมีขนาดเล็กมาก อีกทั้งซิงค์สเตียเรทมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต (190 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจึงเกิดการแตกตัวของซิงค์สเตียเรทเป็นซิงค์ไอออน ส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น อีกทั้งซิงค์สเตียเรทมีขนาดเล็กอาจเกิดการแทรกตัวหรือกระจายตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิพรอพิลีน นอกจากนั้นสารที่เติมเข้าไปจะไปแทรกทำให้ช่องว่างระหว่างอะเซทิลีนแบล็คและเส้นใยคาร์บอนลดลง ทำให้เกิดการนำไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลให้การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น โดยการเติมซิงค์สเตียเรท 5 phr และไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 phr ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด (5.006 ซีเมนส์/เซนติเมตร) และเมื่อเปรียบเทียบการนำไฟฟ้ากับพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนเติมสารเติมแต่ง (3.363 ซีเมนส์/เซนติเมตร) พบว่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น



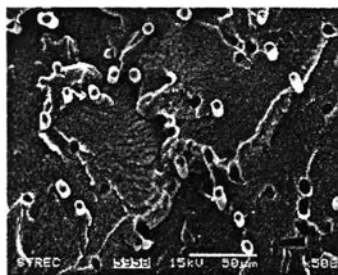
ก) Z1T1



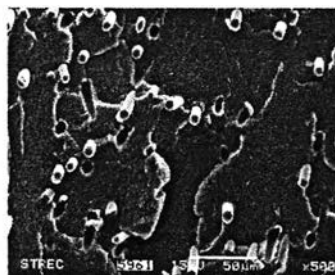
ข) Z3T1



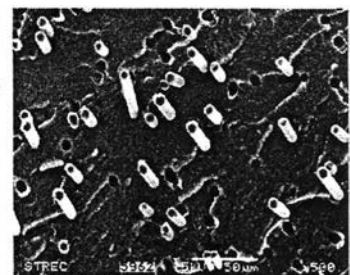
ค) Z5T1



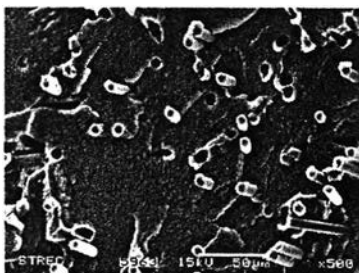
ง) Z1T3



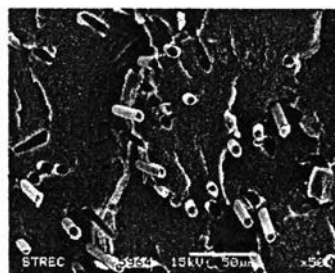
จ) Z3T3



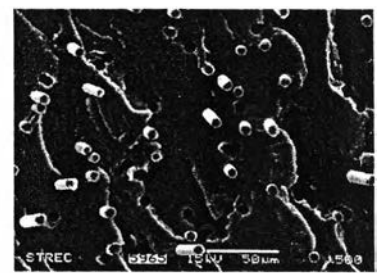
ฉ) Z5T3



ช) Z1T3



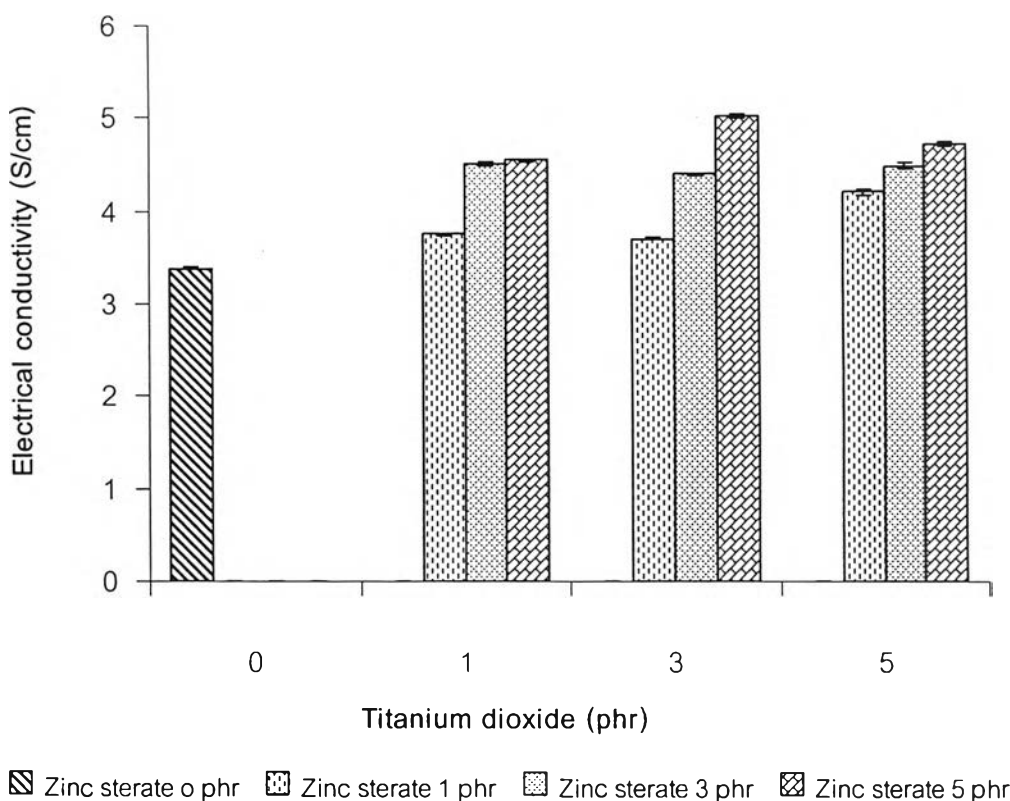
ฑ) Z3T3



ฒ) Z5T3

รูปที่ 4.18 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมซิงค์สเต็มเรทร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ กำลังขยาย 500 เท่า : ก) – ค) ซิงค์สเต็มเรทที่แตกต่างกันโดยน้ำหนักร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 phr ง) – ฉ) ซิงค์สเต็มเรทที่แตกต่างกันโดยน้ำหนักร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 phr และ ช) – ฒ) ซิงค์สเต็มเรทที่แตกต่างกันโดยน้ำหนักร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 phr

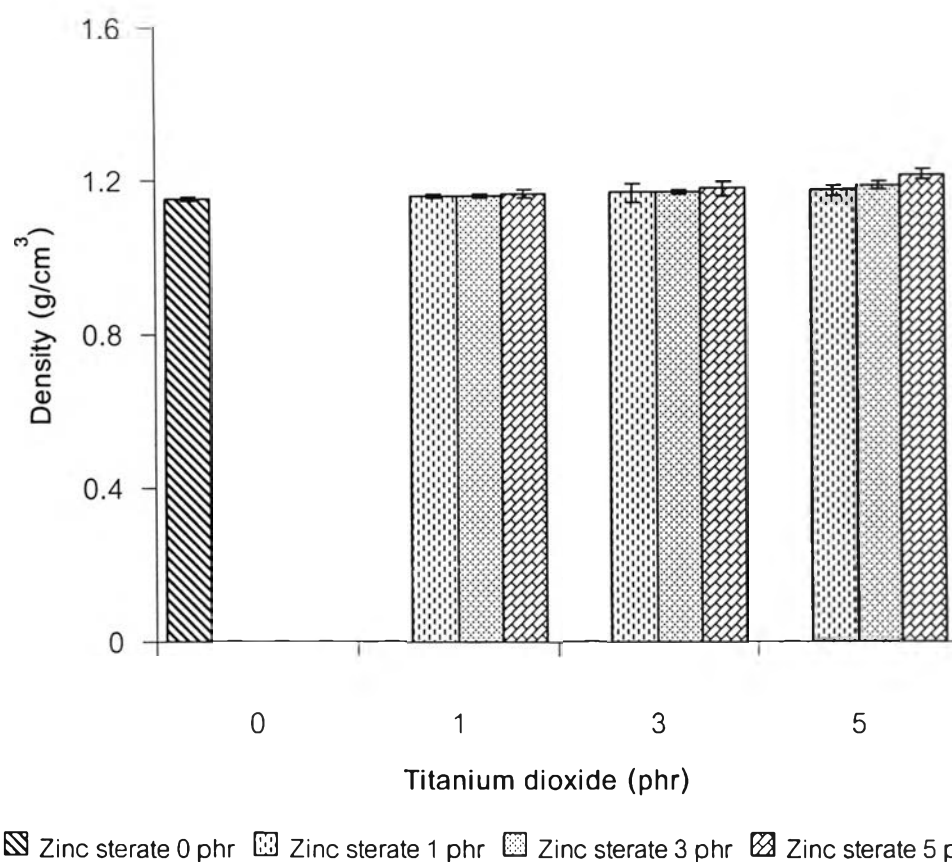
หมายเหตุ ใช้สัญลักษณ์ Z แทนซิงค์สเต็มเรท
T แทนไทเทเนียมไดออกไซด์
ตัวเลขหลังตัว Z และ T แสดงปริมาณของสารเติมแต่งมีหน่วยเป็น phr



รูปที่ 4.19 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง

4.5.4 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต

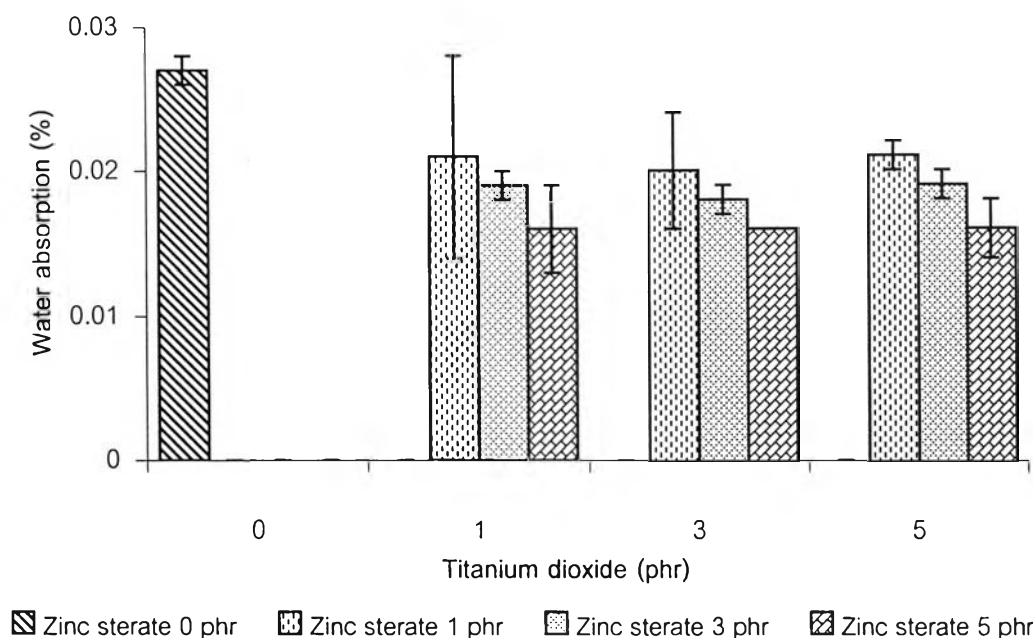
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่งแสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อปริมาณของซิงค์สเตียเรทและไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่แตกต่างกัน โดยความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตอยู่ในช่วง 1.157 – 1.212 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการเติมซิงค์สเตียเรท 5 phr ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 phr ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดคือ 1.212 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนเติมสารเติมแต่ง (1.153 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) พบว่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตทั้งสองแตกต่างกันไม่มากนัก



รูปที่ 4.20 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง

4.5.5 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิต

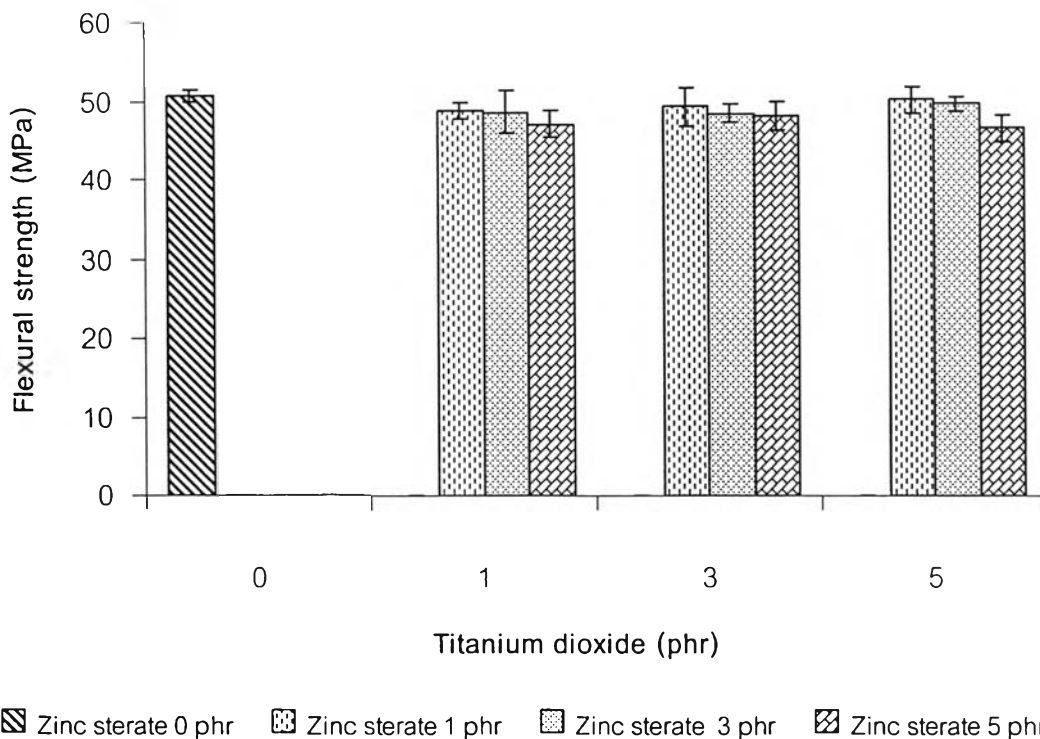
การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่งแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตหลังเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดมีค่าน้อยกว่า (ร้อยละ 0.016 – 0.021) พอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนเติมสารเติมแต่ง (ร้อยละ 0.027) เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากซิงค์สเตียเรทเป็นสารหล่อลื่นและมีขนาดใกล้เคียงกับอะเซทิลีนแบล็คอาจไปบดบังรูพรุนของอะเซทิลีนแบล็คทำให้น้ำไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนได้ (รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.17) อีกทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีขนาดเล็กมาก (รูปที่ 4.17) มีโอกาสเข้าไปในรูพรุนของอะเซทิลีนแบล็คทำให้นรูพรุนของอะเซทิลีนแบล็คตันขึ้น ดังนั้นการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่งทั้งสองจึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณซิงค์สเตียเรทมีผลทำให้การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง



รูปที่ 4.21 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับ เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง

4.5.6 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิต

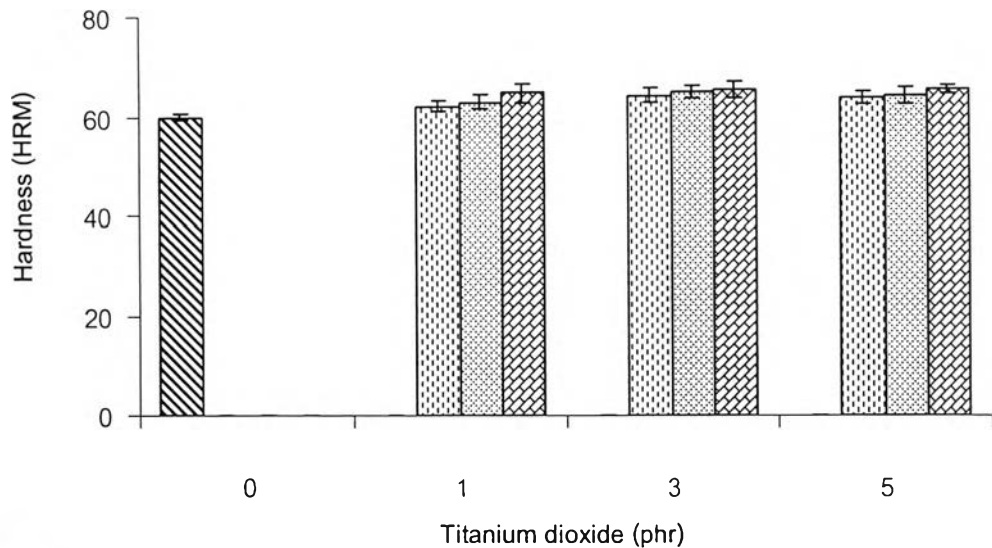
ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่งแสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่งไม่แตกต่างกัน โดยความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตอยู่ในช่วง 46.858 – 49.762 เมกะพาสคัล นอกจากนี้พบว่าการเติมซิงค์สเตียเรทมีผลทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง ในขณะที่การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อความแข็งแรงโค้งงอน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงโค้งงอกับพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนเติมสารเติมแต่ง (50.574 เมกะพาสคัล) พบว่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่งมีค่าลดลงเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากสารเติมแต่งทั้งสองชนิดมีขนาดเล็ก ดังนั้นอาจเกิดการแทรกตัวระหว่างช่องว่างของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าทำให้เกิดการสัมผัสกัน เป็นผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวหน้ากับพอลิพรอพิลีนลดลงด้วย ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจึงถ่ายเทแรงจากพอลิพรอพิลีนไปยังสารเติมแต่งได้น้อยมาก ส่งผลให้พลังงานเกิดการสะสมที่พอลิพรอพิลีนพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงทนต่อความแข็งแรงโค้งงอได้น้อยลง



รูปที่ 4.22 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง

4.5.7 ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิต

ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ร้อยละต่างๆ ของสารเติมแต่งแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่งไม่แตกต่างกัน การเพิ่มปริมาณซิงค์สเตียเรทมีผลทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่แตกต่างกัน โดยความแข็งแรงอยู่ในช่วง 62.04 – 65.06 HRM เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงกับพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนเติมสารเติมแต่ง (59.96 HRM) พบว่าการเติมสารเติมแต่งทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสารเติมแต่งทั้งสองชนิดไปแทรกตัวหรือกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนรวมทั้งแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงต้านทานต่อแรงกดได้มากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น



Zinc stearate 0 phr
 Zinc stearate 1 phr
 Zinc stearate 3 phr
 Zinc stearate 5 phr

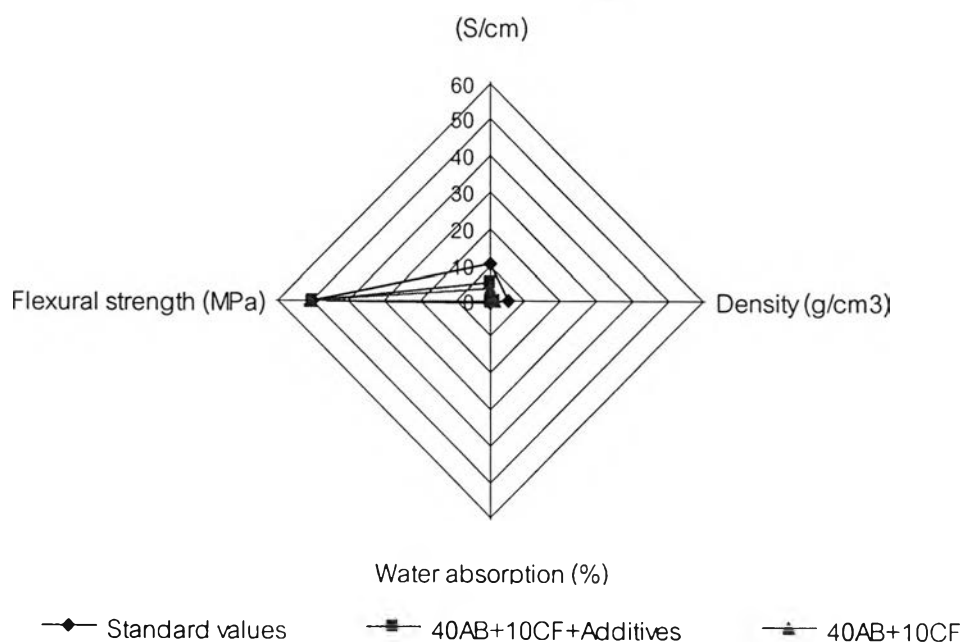
รูปที่ 4.23 ความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่ง

การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่งกับงานวิจัยของ Cho และคณะ [28] แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่งมีค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่า ในขณะที่ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังเติมสารเติมแต่งกับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว [11, 43, 46] (รูปที่ 4.24) พบว่าการเติมสารเติมแต่งทำให้การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนด (10 ซีเมนส์/เซนติเมตร) ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนและหลังเติมสารเติมแต่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์คือน้อยกว่า 5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และน้อยกว่าร้อยละ 0.3 ตามลำดับ ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนเติมสารเติมแต่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์คือ มากกว่า 50 เมกะพาสคัล ในขณะที่พอลิเมอร์คอมโพสิตหลังเติมสารเติมแต่งให้ค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเล็กน้อย สำหรับความแข็งของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วไม่มีค่าอ้างอิง แต่พบว่าการเติมสารเติมแต่งทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่เติมสารเติมแต่งกับงานวิจัยของ Cho และคณะ

สมบัติ	พอลิเมอร์คอมโพสิต (40AB+10CF) ที่เติมสารเติมแต่ง	พอลิเมอร์คอมโพสิตของ Cho และคณะ [28]	
		คอมโพสิตเอ	คอมโพสิตบี
การนำไฟฟ้า (ซีเมนส์/เซนติเมตร)	3.692 - 5.006	0.008	0.007
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.157 - 1.212	1.69	1.82
การดูดซับน้ำ (ร้อยละ)	0.016 - 0.021	0.133	0.287
ความแข็งแรงโค้งงอ (เมกะพาสคัล)	46.858 - 49.762	39.4	20.9



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตก่อนและหลังเติมสารเติมแต่งกับเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว