



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการผลิตพอลิผสม สำหรับวัสดุพอลิเมอร์วิศวกรรม

Developing of the Compounding Techniques for

Engineering Polymers

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการผลิตพอลิผสม สำหรับวัสดุพอลิเมอร์วิศวกรรม

Developing of the Compounding Techniques for Engineering Polymers

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุทัย มีคำ

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวอรอุมา เจริญสุข

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2544

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนในการวิจัย จากสภาวิจัย ประจำปีงบประมาณ2544

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ พอลิคาร์บอนเนตเสริมแรงด้วยเส้นใย 3 ชนิดเตรียม โดยเครื่องบดผสมภายใน เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยวและแกนคู่ และ การบดผสมโดยใช้เครื่องมือร่วมกัน ระบบอีพอกซีกับตัว ทำแข็ง คีดีเอส ใช้เป็นสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกับพอลิคาร์บอนเนต ผลการ ทดลองพบว่า ความยาวของเส้นใยในพอลิเมอร์ผสม ไม่ขึ้นกับความยาวของเส้นใยเริ่มต้นทั้งระบบที่ มีการใช้และไม่ใช้อีพอกซีเป็นสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ และการใช้เครื่องบดผสมภายในทำ ให้ขนาดของเส้นใยมีขนาดสั้นที่สุด ในขณะที่เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยวทำให้ขนาดของเส้นใยยาว ที่สุด

การใช้ระบบอีพอกซีที่ 1% ในการผสมพอลิคาร์บอนเนตโดยใช้เครื่องบดผสมแบบแกนคู่ พบว่า อุณหภูมิการบดขยี้มีค่าลดลงแต่คุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ มีค่าเพิ่มขึ้นและดีกว่าพอลิคาร์บอนเนต ที่ไม่มีอีพอกซี และ ผลการทดลองยังพบอีกว่า เครื่องมือผสมแบบแกนคู่เป็นเครื่องมือผสมที่ เหมาะสมที่สุด คุณสมบัติของ พอลิคาร์บอนเนตผสมจะมีค่าแตกต่างกันเมื่อใช้เครื่องมือผสมต่างชนิด กัน ผลการเสริมแรงพอลิคาร์บอนเนตด้วยเส้นใยคาร์บอน เส้นใยเคฟลา และเส้นใยแก้วพบว่า ปริมาณเส้นใยที่ผสมที่เหมาะสมคือ เส้นใยคาร์บอน 5% เส้น ใยเคฟลา 10% และเส้นใยแก้ว 15% โดยน้ำหนัก ทั้งระบบการผสมที่มีและไม่มีสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้อีพอกซี

เครื่องผสมแบบแกนคู่เป็นเครื่องมือที่ให้ประสิทธิภาพการผสมเส้นใยกับพอลิคาร์บอนเนต ที่ดีที่สุด และ ที่ปริมาณเส้นใยผสมที่ได้แต่ละชนิดพบว่า สารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้อีพอกซี ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอนเนตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่พอลิคาร์บอนเนตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยเคฟลา มีคุณสมบัติเชิงกลลดลงเมื่อมีการ ใช้ ระบบอีพอกซีเป็นสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้

การศึกษา โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดพบว่า ระบบอีพอกซีที่ 1% สามารถทำหน้าที่ เป็นตัวต้านทานการแตกหักของผสมพอลิคาร์บอนเนตได้ โดยเฉพาะพอลิคาร์บอนเนตที่เสริมแรงด้วย เส้นใยแก้วจะเห็นการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่การใช้อีพอกซี เป็นสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ไม่ได้มีผลทำให้พอลิคาร์บอนเนตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยเคฟลาสามารถยึดติดกันได้ดีขึ้น

ABSTRACT

The fibres reinforced PC were prepared by using internal mixer, single and twin screw extruders, and its combination. The epoxy/DDS system was used as compatibiliser. The final fibres length in the PC compound was not depended on the initial length for both uncompatibilised and 1% compatibilised systems. The internal mixer gave rise to the shortest final fibre length but single screw mixer lead to the longest one.

The compatibilisation of PC blends using 1% epoxy and DDS system as compatibiliser mixed in twin screw extruder had shown the lower HDT but superior in mechanical properties than the neat PC. The study had also revealed that the twin screw extruder offer the best alternative for the mixing equipment. The properties of the PC compounds were varied when the difference mixers were used for both compound systems. For reinforcing PC with carbon, kevlar and glass fiber, the optimal fiber contents were observed at 5%, 10% and 15% by weight, respectively, for both systems.

The twin screw extruder was found the most effective mixer for compounding those fibres reinforced PC. At the optimal fibre contents, the epoxy compatibiliser had been successfully used to improve the mechanical properties of the fibre glass reinforced PC. However, the properties of carbon and kevlar fibres reinforced PC were not enhanced by adding the compatibiliser.

The SEM study had indicated that 1% of epoxy was an effective fracture toughener for the PC compound. It has also illustrated that 1% epoxy was successfully used as compatibiliser for the fibre glass reinforced PC as indicated by the adhesion between fibre and polymer phase. Nevertheless, it was not ineffectively used for the carbon and kevlar reinforcements.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญ และ ที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 แหล่งที่มาข้อมูล และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	8
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
บทที่ 2 วิธีการทดลอง	
2.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	10
2.2 วัสดุ และ สารเคมี.....	10
2.3 เครื่องจักรบดผสม.....	13
2.4 เทคนิคการตรวจสอบคุณลักษณะ และ การทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง.....	15
บทที่ 3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
3.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดของพอลิคาร์บอเนต.....	20
3.2 การวิเคราะห์ความยาวเส้นใย.....	21
3.3 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตที่มีการใช้ระบบอีพอกซีเป็น สารช่วยให้ผสมเข้ากัน.....	23
3.4 คุณสมบัติเชิงกล และ เชิงกลทางความร้อน ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรง ด้วยเส้นใยสั้น บด โดยเครื่องผสมแบบแกนคู่.....	27
3.5 การเปรียบเทียบเครื่องบดผสม.....	33

3.6 การตรวจสอบทางสัมมนาวิทยา.....	41
บทที่ 5 บทสรุป.....	47
บรรณานุกรม.....	49
ประวัติผู้วิจัย.....	53
ประวัติผู้ร่วมวิจัย.....	58
ภาคผนวก.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการผสมที่ทำการศึกษาวิจัย.....	9
2.1 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต.....	11
2.2 คุณสมบัติของอีพอกซีแข็งและตัวเชื่อมต่อ.....	12
2.3 คุณลักษณะของเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และเส้นใยคาร์บอน.....	13
3.1 แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดของพอลิคาร์บอเนตที่มีอีพอกซีแข็งและไม่มีอีพอกซีแข็งผสม.....	21
3.2 สรุปผลการวิเคราะห์หาขนาดของเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และเส้นใยคาร์บอน ภายหลังจากการผสมกับพอลิคาร์บอเนตที่ 5% โดยน้ำหนัก.....	22
3.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน ภายหลังจากการผสม กับ พอลิคาร์บอเนตทั้งที่ใช้และไม่ใช้อีพอกซีเป็นสารช่วยให้เข้ากันได้.....	23
3.4(a) สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนต(PC) และ พอลิคาร์บอเนตผสมอีพอกซี((PC)+Epoxy) ที่ผสม โดยวิธีการบดผสมแบบต่างๆ.....	25
3.4(b) สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนต(PC) และ พอลิคาร์บอเนตผสมอีพอกซี((PC)+Epoxy) ที่ผสม โดยวิธีการบดผสมแบบต่างๆ.....	25
3.5 คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว.....	29
3.6 คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลา.....	31
3.7 คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน.....	33
3.8(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้ว บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	36
3.8(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้ว และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	36

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.9(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 10% เส้นใยเคฟลา บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน	38
3.9(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 10% เส้นใยเคฟลา และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	38
3.10(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	40
3.10(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	40

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.9(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 10% เส้นใยเคฟลา บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน	38
3.9(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 10% เส้นใยเคฟลา และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	38
3.10(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	40
3.10(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	40

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 กราฟแท่งเปรียบเทียบคุณสมบัติของพอลิคาร์บอนเนต.....	26
3.2 กราฟแท่งเปรียบเทียบคุณสมบัติของพอลิคาร์บอนเนตที่มีอีพอกซีเป็นสารช่วยให้ผสม เข้ากัน.....	26
3.3 ภาพสัณฐานวิทยาของ (a) พอลิคาร์บอนเนต และ (b) พอลิคาร์บอนเนตผสมอีพอกซี	42
3.4 ภาพถ่าย SEM รอยหักของพอลิคาร์บอนเนตผสม เสริมแรงด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน ที่ (a) ไม่เติม และ (b)เติมสารอีพอกซี กำลังขยาย 1000 เท่า	43
3.5 ภาพถ่าย SEM รอยหักของพอลิคาร์บอนเนตผสม เสริมแรงด้วย 10% เส้นใยเคฟลา ที่ (a) ไม่เติม และ (b)เติมสารอีพอกซี กำลังขยาย 1000 เท่า	44
3.6 ภาพถ่าย SEM รอยหักของพอลิคาร์บอนเนตผสม เสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้ว ที่ (a) ไม่เติม และ (b)เติมสารอีพอกซี กำลังขยาย 1000 เท่า	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และ ที่มาของปัญหาการวิจัย

พอลิคาร์บอเนต(Polycarbonate) เป็นวัสดุพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมพลาสติก(Thermoplastic) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุพอลิเมอร์เชิงวิศวกรรม(Engineering Polymers) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความเหนียว และ ความใส โครงสร้างประกอบด้วยหน่วยซ้ำที่เป็นพันธะเอสเทอร์ของกรดคาร์บอนิก(Ester of Carbonic Acid) โดยทั่วไปมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน(Number Average Molecular Weight, \bar{M}_n) อยู่ระหว่าง 20,000 – 50,000 กรัม ต่อ โมล อุณหภูมิการหลอมเหลว(Melting Temperature, T_m) อยู่ระหว่าง 230 – 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นยาง หรือ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว(Glass Transition Temperature, T_g) ประมาณ 149 องศาเซลเซียส และ มีอุณหภูมิการขึ้นรูป(Processing Temperature, T_p) อยู่ระหว่าง 230 – 320 องศาเซลเซียส เมื่อหลอมเหลวจะมีค่าความหนืดสูง(Hagenaars *et al.*, 2002) ดังนั้นพอลิคาร์บอเนตจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปค่อนข้างยากเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่งผลให้มีความหนืดสูง และ ต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูงอีกด้วย แต่เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตมีคุณสมบัติที่เด่น ๆ เหนือวัสดุพอลิเมอร์อื่นมากมาย เช่น เหนียว ใส และ ทนความร้อนสูง จึงได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เลนส์ อุปกรณ์กีฬา วัสดุก่อสร้าง และ อุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย

แต่อย่างไรก็ตามพอลิคาร์บอเนตก็มีข้อจำกัดบางประการซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ถ้าขึ้นรูปชิ้นงานหนาๆ หรือ มีรอยบาก หรือ รอยแตกที่ผลิตภัณฑ์ หรือ ใช้งานที่อุณหภูมิค่า ความเหนียวก็จะลดลง(Kayano *et al.*, 1996) ดังนั้น ได้มีการค้นคว้า และ วิจัยวัสดุพอลิเมอร์เสริมแรงที่มีคุณสมบัติตามต้องการ แต่เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นโซ่ยาว มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้การผสมเข้ากับวัสดุอื่น ๆ เป็นไปได้ยากเพราะว่ามีแรงยึดระหว่างผิวของผสมต่ำ มีความหนืดสูง ทำให้ผสมเข้ากันแล้วได้คุณสมบัติที่ไม่ดีขึ้น จึงมีการปรับปรุงแรงยึดระหว่างผิวของส่วนผสมให้ดีขึ้น โดยใช้สารช่วยทำให้สามารถผสมเข้ากันได้(Compatibilisers) ซึ่งสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้มีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ (1) ช่วยลดแรงดึงผิวระหว่างของผสมทำให้เพิ่มความเข้ากันได้ของชั้นผิว (2) ช่วยรักษาโครงสร้างระหว่างชั้นผิวให้มีความเสถียร และ (3) ปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นผิวของของผสมให้ดีขึ้น

วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิคาร์บอนเนตให้มีความแข็งแรง และ ทนความร้อนมากขึ้น อีกวิธีหนึ่งคือ การเสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรง โดยทั่วไปเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อการเสริมแรงมี 3 ประเภท คือ เส้นใยพอลิเมอร์(Polymeric Fiber) เส้นใยเซรามิก(Ceramic Fiber) และ เส้นใยแก้ว(Glass Fiber) ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทดลองใช้เส้นใยที่นำมาเสริมแรงพอลิคาร์บอนเนต 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา(Kevlar Fiber) และ เส้นใยคาร์บอน โดยที่เส้นใยแก้วจัดอยู่ในประเภทเส้นใยเซรามิก ส่วนเส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ โดยปกติในการผสมพอลิเมอร์กับวัสดุตัวเติมชนิดต่าง ๆ จะไม่สามารถผสมเข้ากันได้ เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์มีความหนืดสูง และมีโครงสร้างทางเคมีที่ค่อนข้างจะเข้ากับวัสดุอื่นได้ยาก จึงทำให้ของผสมที่เตรียมได้เกิดการแยกกันอยู่ หรือ เข้ากันไม่ได้(Immiscible) ส่งผลให้คุณสมบัติของผสมที่ได้ไม่แข็งแรง เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการเติมสารช่วยในการผสม หรือ สารเติมประสาน(Compatibiliser) เพื่อให้พอลิเมอร์ และ สารตัวเติมต่างๆ สามารถผสมเข้ากันได้ ซึ่งสารช่วยในการผสมจะต้องสามารถทำปฏิกิริยากับของผสมเพื่อให้เกิดแรง/พันธะ ยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นผิวของของผสมทำให้สามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้น คุณสมบัติที่ได้ก็จะแข็งแรงมากขึ้นตามต้องการ

กระบวนการผสม(Mixing) เป็นกระบวนการพื้นฐานในการผลิต และ ขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง ส่วนการบดผสม(Compounding) หมายถึง การนำเม็ด หรือ ผงพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้น ผสมกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยเสริมแรง(Reinforcing Agent) สารเติมแต่ง(Fillers) สี(Colorant) สารต้านทานการเสื่อมสลาย(Stabilisers) สารหน่วงการติดไฟ(Flame Retardants) สารบ่มปฏิกิริยา(Curing Agent) และ ตัวเติม(Additives) ชนิดอื่นๆ ที่สามารถผสมกันได้ ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อที่จะสามารถนำของผสมที่ได้นี้ไปทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป

อีพอกซี (Epoxy) เป็นวัสดุพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมเซต ที่นิยมใช้กัน ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์เสริมแรง(Composite Materials) ชนิดหนึ่ง เนื่องจากอีพอกซีสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น สามารถสังเคราะห์ให้ได้โครงสร้างทางเคมีขั้นต้นเพื่อให้ได้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ตรงตามที่ต้องการได้ ยกตัวอย่างเช่น ใช้อีพอกซีที่สามารถเกิดร่างแห(Crosslink) ได้มาก ก็จะทำให้มีคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นยาง และมีคุณสมบัติเชิงกลสูง ในทางกลับกันถ้าใช้ตัวทำแข็งที่มีความยืดหยุ่นได้ มาทำปฏิกิริยา กับ พวเทอร์โมเซต จะทำให้ได้โครงสร้างเครือข่ายที่มีความยืดหยุ่นสูง จะทำให้มีคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะที่ต่ำ(Carfagna *et al.*, 2000) โครงสร้างทางเคมีของ อีพอกซี จะมีโครงสร้างคล้ายกับ โครงสร้างของพอลิคาร์บอนเนต และ มีความสามารถในการยึดติดกับเส้นใยเสริมแรงได้ดี ดังนั้นด้วยเหตุผลนี้จึงจะนำระบบอีพอกซีเข้ามาใช้เป็นสารช่วยเพิ่ม

ได้ของพอลิคาร์บอเนต กับ เส้นใย ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ระบบอีพอกซีคือ อีพอกซีแข็ง DGEBA และตัวเชื่อมต่อเอมีน DDS

เครื่องมือในการบดผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องมือผสมแบบผสมครั้งต่อครั้ง(Batch) และ เครื่องมือผสมแบบผสมต่อเนื่อง(Continuous) สำหรับเครื่องผสมแบบผสมครั้งต่อครั้งจะทำการผสมโดยนำส่วนผสมทั้งหมดใส่ในถังผสมที่มีแกนหมุนบดผสม(Mixing Rotor) ช่วยในการผสมพร้อมกัน แต่เครื่องผสมแบบผสมต่อเนื่องจะทำการผสมโดยใส่ของผสมอย่างต่อเนื่องลงไป ในเครื่องผสม และ ของผสมที่ผสมได้แล้วจะค่อย ๆ ไหลออกจากเครื่องผสม ในอุตสาหกรรมการเตรียมพอลิเมอร์ผสม เครื่องบดผสมที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ เครื่องผสมแบบภายใน (Internal Mixer) ซึ่งเป็นระบบดั้งเดิม หรือ แบบครั้ง ต่อ ครั้ง และเครื่องผสมแบบแกนเกลียวหมุน(Screw) ซึ่งทั้งแบบแกนเดี่ยว(Single Screw) และ แกนคู่(Twin Screw Extruder) โดยที่ระบบผสมแบบแกนคู่จะให้ประสิทธิภาพการผสมดีกว่า แกนเดี่ยว

1.2 แหล่งที่มาข้อมูล และ งานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิคาร์บอเนตผสม

Tjong และ Meng(2000) ได้ศึกษาการผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต กับ พอลิเอทิลีนในไตรบิวทอะไดอิน สไตรีน (Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) โดยใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์(Maleic Anhydride, MA) เชื่อมต่อกับ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) และ อีพอกซีแข็ง โดยทำการตรวจสอบผลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา(Morphology) และ คุณสมบัติเชิงกลของของผสมที่ได้ ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางแรงดึง และการต้านแรงกระแทกของของผสมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 ชนิดของการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ คือ ที่อัตราการผสมอีพอกซีแข็งเท่ากับ 2 phr และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ 30%โดยน้ำหนักโดยผสมกับ PC/ABS ที่อัตราส่วน 70/30% น้ำหนักต่อน้ำหนัก ซึ่งในผลการวิจัย ยังพบอีกว่าคุณสมบัติการต้านการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงความเข้ากันได้แล้ว มีคุณสมบัติเหนียวใกล้เคียงกับความเหนียวของพอลิคาร์บอเนต

Choi และ คณะ(1997) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางแรงดึง คุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา และ คุณสมบัติทางความร้อน ของพอลิฟีนิลีนซัลไฟด์(Poly(phenylene sulfide, PPS) ผสมกับพอลิคาร์บอเนต และ พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ ผสมกับ พอลิคาร์บอเนต และ อีพอกซี ผลการศึกษาพบว่า น้ำหนักโมเลกุลโดยความหนืด(Viscosity Average Molecular Weight, \bar{M}_v) ของ PC ค่อย ๆ ลดลงเป็นอัตราส่วนเมื่อผสมกับ ปริมาณของ PPS และ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นยาง จะ

ลดลงไม่มากเมื่อใช้อีพอกซี เป็นสารช่วยเพิ่มกันได้ของผสมระหว่าง PC/PPS ซึ่งอธิบายได้ว่า อีพอกซีเข้าทำปฏิกิริยากับ PC สายโซ่สั้น ที่สลายตัวมาจากปฏิกิริยาการผสมระหว่าง PC/PPS คุณสมบัติทางแรงดึงของของผสม PC/PPS ที่มีอีพอกซี เพิ่มขึ้นมากกว่า 100% เมื่อเปรียบเทียบกับของผสมที่ไม่มีอีพอกซี ซึ่งการทดลองนี้พบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้อีพอกซี ในปริมาณเล็กน้อยในของผสม PC/PPS ทำให้ของผสมสามารถผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน

1.2.2 การปรับปรุงความเหนียวในระบบอีพอกซี

Rong และ Zeng (1996) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของอีพอกซี ชนิด DGEBA ด้วยพอลิคาร์บอเนต และ ใช้ DDS กับ มาเลอิกแอนไฮไดรด์(MA) เป็นตัวทำแข็ง ซึ่งทำการตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิคาร์บอเนต กับ อีพอกซี ในการหลอมเหลวก่อนที่จะทำให้อีพอกซีแข็งตัว(Cured Epoxy) ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการแข็งตัวของอีพอกซีเกิดขึ้นพร้อมกับ ปฏิกิริยาระหว่างอีพอกซี กับ พอลิคาร์บอเนต แต่เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เกลือแอมโมเนียม(Ammonium Salts) ในระบบ พบว่ากระบวนการแข็งตัวของอีพอกซีเกิดขึ้นเป็น 2 ช่วง และ อัตราการแข็งตัวใกล้เคียงกับอีพอกซีอย่างเดียวนอกจากนั้น Rong และ Zeng ยังได้ศึกษาสัณฐานวิทยา และการแยกสถานะวัฏภาค ของระบบนี้เพิ่มเติมอีกในปีค.ศ. 1997 ผลการศึกษาพบว่า การเกิดการแยกสถานะเชิงวัฏภาค ระหว่างของผสม สามารถกำหนดได้โดยอัตราส่วนระหว่างพอลิคาร์บอเนต กับ อีพอกซี ที่ใช้ และ ชนิดของตัวทำแข็ง การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเกิดขึ้นจากการขาดกันของสายโซ่พอลิคาร์บอเนต ในระหว่างกระบวนการหลอมเหลวผสม ทำให้มีผลต่อการเกิดผลึก (Crystallisation) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า พันธะไฮโดรเจน และ ปฏิกิริยาการเชื่อมต่อนของ PC/Epoxy ในระหว่างการหลอมเหลวผสม ซึ่งเป็นตัวควบคุมการแยกสถานะ และ สัณฐานวิทยาของของผสมที่ได้

Don และ Bell (1998) ได้ศึกษาพบว่าพอลิคาร์บอเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน(Transesterification Reaction) และ ปฏิกิริยาแบบเพิ่ม(Addition Reaction) กับ DGEBA ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสลายของสายโซ่พอลิคาร์บอเนตที่มีหมู่สุดท้ายเป็นฟีนอลิก(Phenolic End Group) และ โคลิโพลิเมอร์ของพอลิคาร์บอเนต กับ อีพอกซี ตัวทำแข็งที่ใช้เป็นอะโรมาติกเอมีน ไดอะมีโนไดฟีนิลมีเทน(Diaminodiphenyl Methane, DDM) ผลการศึกษายังพบอีกว่าการเติมพอลิคาร์บอเนตทำให้ปฏิกิริยาระหว่างอีพอกซี และ ตัวบ่มปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากหมู่สุดท้ายที่เป็นฟีนอลิกของพอลิคาร์บอเนตจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ แต่พอลิคาร์บอเนตก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกระบวนการแข็งตัวของอีพอกซีได้ ต่อมาในปีค.ศ. 1999 Don และ Bell ยังได้ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมอีพอกซี กับ พอลิคาร์บอเนตเพิ่มเติม โดยศึกษา

กระบวนการผสม 2 วิธีด้วยกัน คือ การผสมโดยการละลายในตัวทำละลาย(Solution-Blending, SB) กับ การผสมโดยการหลอมเหลว(Melt-Blending, MB) ผลการศึกษาพบว่า การเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการผสม MB ระหว่างอีพอกซี ชนิด DGEBA กับ พอลิคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถเกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิ(Secondary Hydroxyl Groups) ของอีพอกซี กับ หมู่คาร์บอเนตของพอลิคาร์บอเนต ทำให้เกิดการสลาย ของสายโซ่พอลิคาร์บอเนตที่มีหมู่สุดท้ายเป็นฟีนอลิก(Phenolic End Group) และโคพอลิเมอร์ของพอลิคาร์บอเนต กับ อีพอกซี เช่นกัน อีพอกซีที่มีฟีนอลิก คาร์บอเนตที่ได้ ยังมีความเหนียวเพิ่มขึ้นอีกด้วย เนื่องจากมีสายโซ่ที่ยึดหยุ่น ใต้ของพอลิคาร์บอเนตในโครงสร้างของอีพอกซี

1.2.3 ผลของตัวทำแข็ง เอมีน ในระบบอีพอกซี

Boey และ คณะ(1999) ได้ศึกษาผลของการใช้ตัวทำแข็ง ที่แตกต่างกันในระบบอีพอกซีโดยใช้กระบวนการทำแข็งด้วยระบบไมโครเวฟ ชนิดของตัวทำแข็ง ที่ใช้มี 3 ชนิดด้วยกันคือ DDS DDM และ *m*-Phenylene-Diamine(mPDA) โดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry(DSC) หาอุณหภูมิในการแข็งตัว ผลการศึกษาพบว่า อัตราการเร็วการแข็งตัวต่ำ เมื่อมีการใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟต่ำ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวทำแข็ง DDS ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง DDS กับ อีพอกซี ส่งผลให้เกิดโครงสร้างในการแข็งตัว ของอีพอกซีไม่สมบูรณ์ ส่วนตัวทำแข็ง DDM กับ *m*-PDA สามารถทำปฏิกิริยากับ อีพอกซีได้เร็วกว่า DDS ทำให้กระบวนการแข็งตัวของอีพอกซีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

1.2.4 ผลของตัวเสริมแรงเส้นใย

1.2.4.1 ผลของความยาว และ ปริมาณการเติมของเส้นใยเสริมแรง

Thomason และ Vlug (1996) ได้ศึกษาอิทธิพลของความยาวเส้นใย ที่มีความยาวระหว่าง 0.1 มิลลิเมตรถึง 10 มิลลิเมตร และ ปริมาณความเข้มข้นของเส้นใยที่เติม ระหว่าง 3% น้ำหนักค่อน้ำหนักถึง 60% โดยน้ำหนัก ต่อคุณสมบัติของโพลีโพรพิลีน เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ผลการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงเหนียว(Stiffness) ที่ได้ เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นตรง กับ ความเข้มข้นเส้นใยจนถึงค่าที่ 40% ในขณะที่ความแข็งแรงเหนียวไม่สัมพันธ์ กับ ความยาวของเส้นใยเมื่อความยาวของเส้นใยมากกว่า 0.5 มิลลิเมตร และ เมื่อปริมาณของเส้นใยที่สูงมากกว่า 40% พบว่ามีปัญหาต่อความสามารถในการเติมเส้นใย(Fiber Loading) และ เกิดฟองอากาศขึ้นภายใน ส่งผลให้คุณสมบัติที่ได้ลดลง นอกจากนี้ยัง

พบอีกว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิโพพิลีน และ ความเข้ากันได้ของเส้นใย กับ พอลิโพพิลีนมีผลต่อความแข็งแรงเหนียวที่ได้ของผลิตภัณฑ์น้อย

1.2.4.2 พอลิคาร์บอเนตเสริมแรงเส้นใยแก้ว

Ho และ Jeng(1997) ได้ศึกษาลักษณะผลกระทบ และ วิธีการเสียดสีบนส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร(Tribological Characteristics) ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วสั้น โดยใช้เส้นใย 20% โดยน้ำหนัก และ มีการใช้สารช่วยลดการเสียดสี และ สารเพิ่มความต้านทานแรงกระแทกให้กับของผสมด้วย ซึ่งทดสอบได้ถูกเตรียมขึ้นโดยวิธีการฉีดขึ้นรูป(Injection Molding) ที่เงื่อนไขการขึ้นรูปแตกต่างกัน คือ เวลาการฉีดเข้าแม่พิมพ์(Filling Time) อุณหภูมิการหลอมขึ้นรูป(Melt Temperature) และ อุณหภูมิของแม่พิมพ์(Mold Temperature) ผลการศึกษาพบว่า การสูญเสียปริมาตรเนื้อแม่พิมพ์ ในทิศทางเสียดสีที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลน้อยกว่า ในทิศทางเสียดสีที่ขนานกับทิศทางของการไหลของพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใยแก้ว กระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการเสียดสีน้อยที่สุด คือ เวลาการฉีดเข้าแม่พิมพ์ 5 วินาที อุณหภูมิการหลอมขึ้นรูป 290 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ Chang และ คณะ(2000) ได้ศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงเส้นใยแก้วสั้นโดยวิธีวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบ Grey (Grey Relational Analysis) ที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่า เกิดชั้นผิวในผลิตภัณฑ์ 3 ชั้นผิวด้วยกัน คือ ชั้นผิวแข็งตัว(Frozen Layer) ชั้นผิวเนียน (Shear Layer) และชั้นผิวแกนใน(Core Layer) ที่มีขนาดแตกต่างกันไป ขึ้นกับเงื่อนไขของกระบวนการฉีดขึ้นรูป และ พบว่าทิศทางของเส้นใยจะตั้งฉากกับ ทิศทางการไหลของเนื้อพอลิเมอร์ในชั้นผิวแข็งตัว และ ชั้นผิวแกนใน ส่วนในชั้นผิวเนียนพบว่าทิศทางของเส้นใยจะขนานกับทิศทาง การไหล

1.2.4.3 ระบบอีพอกซีเสริมแรงเส้นใยแก้ว

Kaynak และ คณะ(2003) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติการยึดหยุ่นของอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วสั้น โดยใช้ของเหลวอีลาสโตเมอร์(Liquid Elastomer) ชนิดของอีพอกซีที่ใช้คือ DGEBA และ ชนิดของตัวปรับปรุงคุณสมบัติคือ Hydroxyl Terminated Polybutadiene (HTPB) และ ใช้สารประกอบไซเลน เป็นสารคู่ควบ(Silane Coupling Agent, SCA) เพื่อเป็นตัวปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยแก้ว กับ อีพอกซี ผลการศึกษาพบว่า ผิวของเส้นใยแก้วที่ปรับปรุงด้วย SCA แล้ว และ อีพอกซีที่ปรับปรุงด้วย HTPB ทำให้คุณสมบัติทางความยืดหยุ่นดีขึ้น เนื่องจาก

เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใย อีพอกซี และ ยาง ที่แข็งแรง โดยที่ยางได้เข้าไปอยู่ในโครงสร้างอีพอกซี ทำให้ชั้นทดสอบที่ได้มีความเหนียวยืดหยุ่นมากขึ้นอีกด้วย

1.2.4.4 พอลิคาร์บอเนตเสริมแรงเส้นใยเคฟลา

Tanaka และคณะ(2001) ได้ศึกษาพัฒนากระดที่มีน้ำหนักเบาโดยใช้เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง ชนิด เส้นใยเคฟลา ที่มีความแข็งแรงสูง ยืดหยุ่นได้ และ น้ำหนักเบาตามต้องการ ผลการศึกษาพบว่า กระดที่ทำขึ้นด้วยเส้นใยเคฟลา สามารถหยุดกระสุน ขนาด 13 มิลลิเมตร น้ำหนัก 1 กรัม ด้วยความเร็ว 6.9 กิโลเมตร ต่อ วินาที ที่ยิงผ่านแผ่นพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงได้ ซึ่งยอมรับได้ว่าเส้นใยเคฟลา สามารถนำมาเสริมแรงเพื่อป้องกันกระสุน และ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบาได้จริง

1.2.4.5 ระบบอีพอกซีเสริมแรงเส้นใยเคฟลา

Anton และ คณะ(1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน และ คุณสมบัติเชิงกล ของระบบ แอนไฮไดรด์ และ ไคเอมีน อีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลา และ ใช้เทคนิค DSC และ Dinamic Mechanical Thermal Analysis(DMTA) เป็นตัวติดตาม ลักษณะของอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาที่ต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของเส้นใยเคฟลาที่แตกต่างกันทำให้มีอัตราการแข็งตัวของอีพอกซีที่แตกต่างกัน และ คุณสมบัติทางความร้อนที่ได้ ขึ้นกับชนิดของอีพอกซีที่ใช้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยเคฟลา ทำให้ลักษณะการไหลของความร้อนจากเทคนิค DSC ของระบบ แอนไฮไดรด์/อีพอกซี ลดต่ำลง ในขณะที่ในระบบไคเอมีน/อีพอกซี จะมีลักษณะแตกต่างกันน้อยมาก และยังพบว่า ระบบแอนไฮไดรด์/อีพอกซี อุณหภูมิ T_g ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณของเส้นใยเคฟลาเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ระบบไคเอมีน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ T_g เมื่อปริมาณของเส้นใยเคฟลาเพิ่มขึ้น

1.2.4.6 พอลิคาร์บอเนตเสริมแรงเส้นใยคาร์บอน

Carneiro และคณะ(1998) ได้ศึกษากระบวนการผลิต และ การประเมินผล ของพอลิคาร์บอเนตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ชนิด Vapour-Grown Carbon Fiber ซึ่งเส้นใยคาร์บอนนี้ถูกเตรียมขึ้นจากมีเทน ในถังเตรียม และ นำเส้นใยที่ได้มาผสมกับพอลิคาร์บอเนตโดยเครื่องผสมแบบแกนคู่(Twin Screw Extruder) ที่มีแกนผสมหมุนตามกัน(Co-rotating) จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยเครื่องมือฉีดขึ้นรูป ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ฉีดขึ้นรูป มีคุณสมบัติ

คิดว่าพอลิคาร์บอเนตที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเล็กน้อย ในขณะที่คุณสมบัติการด้านแรงตก กระแตกลดลงอย่างมากเมื่อมีการเติมเส้นใยคาร์บอน

1.2.4.7 ระบบอีพอกซีเสริมแรงเส้นใยคาร์บอน

Woo และ Mao(1996) ได้ศึกษาสัมพันธภาพของชิ้นงานทดสอบแรงด้านการแตกหัก ของอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน โดยมีการปรับปรุงด้วย PC ซึ่งในกระบวนการเตรียม PC เติมนำ โดยการใช้ตัวทำละลายหลายชนิดนี้ย่นทำให้ PC เกิดการตกผลึกในระหว่างขั้นตอนการเตรียม ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติสัมพันธภาพระหว่างชั้นของ PC กับ อีพอกซี ผสม มีความไม่เข้ากัน ซึ่งเกิดเป็นก้อนผลึกของ PC แยกตัวกับอีพอกซี ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของชิ้นทดสอบที่ได้มีความเปราะ

1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

วัตถุประสงค์ในการศึกษาการเตรียมพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นครั้งนี้ คือ

- (i) เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคของการผสม โดยเครื่องผสมแบบภายใน เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยว และ แกนคู่
- (ii) เพื่อศึกษาสูตรส่วนผสม ของการเตรียมพอลิคาร์บอเนตผสม เสริมแรงด้วยเส้นใย
- และ (iii) เพื่อประเมินผลของการเติมระบบอีพอกซีเพื่อเป็นสารช่วยในการผสมเข้ากันได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาการเสริมแรงพอลิคาร์บอเนตด้วยเส้นใยสั้น โดยใช้เครื่องมือผสม 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องผสมแบบภายใน เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยวและแกนคู่ โดยทำการแบ่งวิธีการผสมเป็น 4 วิธีด้วยกัน คือ วิธีที่ 1(Method I) วิธีที่ 2(Method II) วิธีที่ 3(Method III) และวิธีที่ 4(Method IV) ซึ่งแต่ละวิธีได้อธิบายดังตารางที่ 1.1 ชนิดของเส้นใยที่นำมาผสมมี 3 ชนิดด้วยกัน คือ เส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และเส้นใยคาร์บอนที่มีความยาวของเส้นใยเท่ากับ 8 มิลลิเมตร และ ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติทางความร้อนต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ คุณสมบัติเชิงกลที่ทดสอบ ได้แก่ คุณสมบัติทางแรงดึง(Tensile Properties) คุณสมบัติในการหักงอ (Flexural Properties) และ คุณสมบัติการด้านการกระแทก(Impact Strength) คุณสมบัติทางความร้อนที่ทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิความร้อนการบิดงอ(Heat Distortion Temperature) และ ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของของผสมโดยใช้ระบบอีพอกซีเป็นสารช่วยในการผสม(Compatibiliser)

ซึ่งระบบอีพอกซีที่ใช้เป็นอีพอกซีแข็งชนิด Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) และ ตัวทำ
 แแข็ง(Curing Agent) ได้แก่ 4,4'-Diaminodiphenyl Sulfone (DDS)

ตารางที่ 1.1 วิธีการผสมที่ทำการศึกษาวิจัย

วิธี	รายละเอียดวิธีการผสม	กำหนดรหัส
1	ทำการผสมโดยเครื่องผสมแบบแกนคู่(Twin Screw Extruder)	TWE
2	ทำการผสมโดยเครื่องผสมแบบภายใน (Internal Mixer)	IM
3	ทำการผสมโดยการเตรียมพอลิคาร์บอนเนตกับเส้นใยปริมาณเข้มข้นสูงโดยเครื่องผสมแบบภายใน และ เจือจางให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการ โดยเครื่องผสมแบบแกนเดี่ยว	IM+SSE
4	ทำการผสมโดยเครื่องผสมแบบแกนเดี่ยว(Single Screw Extruder)	SSE

บทที่ 2

วิธีการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองผสมพอลิคาร์บอเนต กับ เส้นใยขนาดสั้น 3 ชนิด โดยทำการทดลองบดผสมแบบหลอมเหลว 4 วิธีการด้วยกัน ตามชนิดของเครื่องบดผสมที่ใช้เป็นหลัก ดังที่สรุปในบทที่ 1 คือ วิธีที่ 1 ทำการบดผสมผสมโดยเครื่องบดผสมแบบแกนคู่ วิธีที่ 2 ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบภายใน วิธีที่ 3 ทำการผสมโดยการเตรียมพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยปริมาณเข้มข้นสูงโดยเครื่องผสมแบบภายใน และจากนั้นนำ บดผสมเจือจางกับเม็ดพอลิเมอร์ให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการ โดยเครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว และ วิธีที่ 4 ทำการบดผสม โดยเครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว ชนิดของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงพอลิคาร์บอเนตมี 3 ชนิด คือ เส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีขนาดของเส้นใยเริ่มต้นที่ 8 มิลลิเมตร โดยมีการใช้ปริมาณของเส้นใยที่แตกต่างกัน คือ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนักตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เครื่องผสมแบบแกนคู่เป็นเครื่องบดผสมอ้างอิง เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของผสมเส้นใยสั้น กับ พอลิคาร์บอเนต และ ใช้ระบบอีพอกซี คือ อีพอกซีชนิดแข็ง DGEBA และ ตัวทำแข็ง ชนิดวงแหวนเอมีน DDS ที่สัดส่วน 1.5 phr เป็นสารช่วยให้พอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยสามารถเข้ากันได้

สำหรับรายละเอียดของวิธีทำการทดลอง วัสดุที่ใช้ การตรวจสอบวัสดุที่ใช้ และ การทดสอบคุณสมบัติของผสมที่ได้ จะอธิบายต่อไปนี้

2.2 วัสดุ และ สารเคมี

วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มด้วยกัน คือ (1) พอลิเมอร์ (2) เส้นใยเสริมแรง และ (3) สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

พอลิคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นเม็ดพอลิคาร์บอเนตของ บริษัท ไทยพอลิคาร์บอเนต จำกัด โดยใช้เกรด S-3000R ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต

คุณสมบัติ	ค่า
¹ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g , °C)	150
¹ อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melt Transition Temperature, T_m , °C)	230
² ความหนาแน่นเม็ดพอลิคาร์บอเนต (Bulk Density, g/ml)	1.23
² ความหนาแน่นพอลิคาร์บอเนตหลอมเหลว (Melt Density, g/ml)	1.20
¹ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Number Average Molecular Weight, \bar{M}_n , g/mol)	10,000
¹ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weight Average Molecular Weight, \bar{M}_w , g/mol)	27,000
² น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด (Viscosity Average Molecular Weight, \bar{M}_v , g/mol)	32,137
² ดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index, MFI (300/2.16,g/10min))	13.20

¹ค่าวิเคราะห์จากทางบริษัทผู้ผลิต

²ค่าวิเคราะห์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

อีพอกซีชนิดแข็ง ไดโกลซิคลิอีเทอร์ออฟบิฟีนอลเอ(Diglycidyl Ether of Bisphenol-A, DGEBA) ที่ใช้ในการทดลองจัดหามาจาก บริษัท ไทยอีพอกซี และ อัลไลด์ โพรคัก จำกัด ชนิด EPOTEC YD-019 และ ตัวทำแข็ง(Curing Agent) ของระบบอีพอกซีที่ใช้คือ DDS ซึ่งเป็นตัวทำแข็งที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในปฏิกิริยาการแข็งตัวของอีพอกซี จัดหามาจาก บริษัท แวนติโก จำกัด คุณสมบัติของอีพอกซีแข็ง และ ตัวทำแข็งที่ใช้ แสดงสรุปดังตารางที่ 3.2 ระบบอีพอกซี และ ตัวทำแข็งดังกล่าวจากการคำนวณตามสมการ 2.1 จะมีอัตราส่วนสมมูล (Stoichiometric Ratio หรือ phr) ในปฏิกิริยาทำแข็งเท่ากับ 2.35 แต่ในการทดลองในครั้งนี้จะใช้อัตราส่วนโดย 100 ส่วน(phr) ของอีพอกซีเพียง 1.5 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ปฏิกิริยาสมมูล เพื่อให้ได้ผลผลิตโครงสร้างของโซ่เป็นแบบ โซ่กิ่ง ขนาดสั้นๆ

$$phr = \frac{AHEW}{EEW} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่ **AHEW** = จำนวนไฮโดรเจนอะตอมของเอมีนที่เข้าทำปฏิกิริยา ต่อ น้ำหนักเป็นกรัม
ของเอมีน

และ **EEW** = จำนวนหมู่อีพอกไซด์ ของ อีพอกซี ต่อ น้ำหนักเป็นกรัมของอีพอกซี

ตัวเส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิดด้วยกัน คือ

1. เส้นใยแก้ว(Glass Fiber, GF) จาก บริษัท สยามเมอร์แคนไทล์ เอเจนซี จำกัด
2. เส้นใยเคฟลา(Kevlar Fiber, KF) จาก บริษัท คูปองท์ จำกัด
3. เส้นใยคาร์บอน(Carbon Fiber, CF) จาก บริษัท แพรนดา จำกัด

โดยเส้นใยทั้งหมดจะอยู่ในรูป เส้นใยยาวต่อเนื่อง(Unidirectional Continuous Fiber, UD) โดยมี คุณสมบัติของเส้นใยทั้งสามชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3 ก่อนนำไปใช้เป็นเส้นใยสั้น จะใช้ กรรไกรเซรามิก ตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ และ นำไปใช้โดยไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวเส้นใย ใดๆ ทั้งสิ้น และ เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ตัวทำแข็ง DDS กับ สารอีพอกซี ณ บริเวณผิวของ เส้นใยได้อย่างสม่ำเสมอ เส้นใยที่ตัดได้ตามขนาดที่ต้องการ จะนำมาเคลือบด้วย สารตัวทำแข็ง โดยการละลายตัวทำแข็ง ตามปริมาณการใช้ที่คำนวณได้ ในสารละลาย อะซิโตน ในปริมาตร โดยประมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นจึงนำเส้นใยสั้นที่ตัดได้ มาแช่ และ กวนผสมให้ทั่ว เป็นเวลา ประมาณ 5 นาที จากนั้นจึงนำ ไประเหยเอาสารละลาย ออก ในเครื่องระเหยสารแบบหมุน(Rotary Evaporator) แล้วนำไปกำจัดตัวทำละลายที่เหลือใน ตู้อบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปใช้ในการบอดผสมต่อไป

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของอีพอกซีแข็งและตัวเชื่อมต่อ

คุณสมบัติ	ค่า
อีพอกซีชนิดแข็ง:	
Epoxy Equivalent Weight (EEW, g/eq)	2,637
จุดอ่อนตัว(Softening Point, °C)	130-145
ความหนืด ณ 25°C(40% in Butylbitol, cPs)	7,490
ปริมาณสารไม่ละลายละลาย(Insoluble Content, ppm)	5
ตัวทำแข็ง DDS:	
Amine Hydrogen Equivalent Weight (AHEW, g/eq)	62
จุดหลอมเหลว(Melting Point, °C)	175

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน

เส้นใย	เส้นใยแก้ว	เส้นใยเคฟลา	เส้นใยคาร์บอน
ค่าดีเนียร์(g/9000m)	19,813	2,989	41,996
ความหนาแน่น(g/ml)	2.50	1.44	1.76

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง เตตระไฮโดรฟูแรน(Tetrahydrofuran, THF) ซึ่งเป็นตัวทำละลาย พอลิคาร์บอนเนต จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ ซี เอส ซีนอน โซเดียมเฮกซะเมทาฟอสเฟต (Sodium Hexametaphosphate) เป็นของเหลวทำให้เส้นใยแก้วกระจายตัว ในการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใย จาก บริษัท อิตัลมาร์จำกัด สารนอนไอเลท พี40 หรือ Nonyphenyl-Polyethylene Glycol(Nonidet P40) ซึ่งเป็นสารช่วยทำให้เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอนกระจายตัวในการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยจาก การ จัดหาจากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ ซี เอส ซีนอน ของเหลว อะซีโตน(Acetone) ซึ่งเป็นตัวทำละลายอี พอกซีจาก และ ใช้ในการดกตะกอน พอลิคาร์บอนเนต จาก บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด โดธสารเคมี ทั้งหมด นำไปใช้โดยตรง โดยไม่ได้ทำการทำบริสุทธิ์ซ้ำอีกครั้ง

2.3 เครื่องจักรบดผสม

เครื่องจักรบดผสมที่ใช้ในการทดลองนี้มี 3 ชนิด คือ เครื่องรีดบดผสมแบบแกนคู่(Twin Screw Extruder) เครื่องบดผสมแบบภายใน(Internal Mixer) และ เครื่องรีดบดผสมแบบแกนเดี่ยว (Single Screw Extruder) ในการผสมแต่ละวิธีจะใช้เครื่องมือบดผสมเพียงชนิดเดียว และ แบบใช้ ร่วมกัน 2 ชนิด

2.3.1 เครื่องรีดบดผสมแบบแกนคู่(Twin Screw Extruder)

เครื่องรีดบดผสมแบบแกนคู่ที่ใช้ทำการทดลองเป็นยี่ห้อ Brabender™ รุ่น DSE 35/17D ซึ่งมี แกนผสมคู่ ที่หมุนตามกัน ที่ส่วนแกนที่ใช้ในการช่วยผสมอยู่ 3 ส่วน และมีหัวรีด 1 ช่อง เป็นแบบ หัวรีดวงกลม(Rounded Die) อุนหภูมิในการบดผสมพอลิคาร์บอนเนต กับ เส้นใยสั้นที่ใช้ จากตำแหน่ง ที่มีการป้อนวัสดุที่จะทำการผสม จนถึงหัวรีดอยู่ระหว่าง 270 – 290 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นตามลำดับ ความเร็วหมุนของแกนบดผสมเท่ากับ 7 รอบต่อนาที ณ ความเร็วดังกล่าว ทำให้ได้เวลาที่วัสดุอยู่ใน กระบอของเครื่องผสมโดยประมาณ 2 นาที นั่นคือ เป็นเวลาที่ทำให้สารอีพอกซี ที่เป็นสารช่วยให้ เกิดการเข้ากัน ได้ของของผสมเกิดการบ่มตัวได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้สารช่วยให้เกิดการเข้ากัน

ใช้ชนิดอีพอกซีเติมลงไปในระบบพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิการผสมจะลดลงเหลือ 230 ถึง 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะหล่อเย็นด้วยอากาศ และ นำไปตัดเป็นเม็ดโดยเครื่องตัดเม็ดขนาดประมาณ 3 – 5 มิลลิเมตร ต่อไป

2.3.2 เครื่องบดผสมแบบภายใน (Internal Mixer)

เครื่องมือผสมภายในที่ใช้ทำการทดลองเป็นยี่ห้อ HAAKE Rheomix รุ่น PolyLab™ ซึ่งประกอบด้วยแกนบดผสม 2 แกนที่หมุนเข้าหากัน (Counter Rotating) อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต กับ เส้นใยเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส และมีลำดับการใส่วัสดุที่จะทำการบดผสมเพื่อให้ได้ความหนืดของผสมขณะทำการบดผสมมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จะต้องมีลำดับการแบ่งใส่ส่วนผสมดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรก ใส่เม็ดพอลิคาร์บอเนตลงไปก่อน แล้วบดผสมจนหลอมละลายประมาณ 1 นาที ขั้นตอนที่สอง เติมเส้นใยครึ่งหนึ่ง กับ อีพอกซีแข็งลงไป และ ทำการผสมประมาณ 2 นาที แต่ในกรณีที่ไม้เติมสารช่วยให้เกิดการเข้ากันอีพอกซี จะทำการเติมเส้นใยครึ่งหนึ่ง ณ นาทีที่ 2 และ เส้นใยอีกครึ่งหนึ่งที่นาทีที่ 4 ของการผสม และ ขั้นตอนสุดท้าย จะเติมเส้นใยที่เหลือ กับตัวทำแข็ง และ ทำการผสมประมาณ 3 นาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการบดผสมทั้งหมดจะเท่ากับ 5 นาที อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้สารช่วยให้เกิดการเข้ากันได้อีพอกซี อุณหภูมิที่ทำการผสมจะลดลงเหลือ 230 องศาเซลเซียส ความเร็วของแกนบดผสมเท่ากับ 60 รอบต่อนาที และ ปริมาณการเติมส่วนผสมลงไปในถังผสมที่ใช้เท่ากับ 70% ของความจุของช่องว่างสำหรับผสม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 330 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อได้ของผสมที่ผสมเรียบร้อยแล้ว นำไปบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ โดยเครื่องบดพลาสติกต่อไป

ในกรณีทำการผสมพอลิคาร์บอเนตแบบความเข้มข้นเส้นใยสูง (Master Batch) โดยใช้เครื่องผสมแบบภายใน แล้วนำไปทำการเจือจาง ให้ได้อัตราส่วนปริมาณของเส้นใยที่ต้องการ ในเครื่องรีดบดผสมแบบแกนเดี่ยวนั้น กระบวนการผสมโดยเครื่องผสมแบบภายในเป็นดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรก ใส่เม็ดพอลิคาร์บอเนต และ บดหลอมละลายผสมประมาณ 1 นาที ขั้นตอนที่สองเติมเส้นใยสันปริมาณสูงตามต้องการลงไปในถังผสม และ ทำการบดผสม 3 นาที อุณหภูมิที่ใช้ทำการผสมเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส และ ความเร็วแกนผสมเท่ากับ 60 รอบ ต่อ นาที จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปบดย่อยต่อไป

2.3.3 เครื่องรีดบดผสมแบบแกนเดี่ยว(Single Screw Extruder)

เครื่องมือผสมแบบแกนเดี่ยวที่ใช้ทำการทดลองเป็นยี่ห้อ Betol รุ่น BC 32 ซึ่งปลายสุดของเกลียวหมุนจะประกอบด้วย ส่วนการของผสมแบบ “Maddock” และ แกนหมุนมีค่าความยาว ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนผสม(L/D Ratio) เท่ากับ 30 และ หัวรีดมีเป็นชนิด 3 ช่องแบบกลม อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยสั้น เริ่มตั้งแต่กรวยป้อนวัสดุที่จะทำการผสมจนถึงหัวรีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 270 – 290 องศาเซลเซียส แต่ในกรณีที่มีสารเติมสารช่วยในการเข้ากันได้ อีพอกซี อุณหภูมิที่ทำการผสมจะลดลงเหลือระหว่าง 230 -250 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของแกนหมุนเท่ากับ 20 รอบ ต่อ นาที ซึ่งจะ ได้เวลาที่ของผสมอยู่ในเครื่องมือรีดบดผสมแบบแกนเดี่ยวเป็นเวลา 2 นาที เช่นเดียวกันกับ เครื่องรีดบดผสมแบบแกนคู่ และ เป็นเวลาที่ทำให้อีพอกซีเกิดปฏิกิริยา กับ ตัวทำแข็ง ในการเติมวัสดุที่จะทำการผสมนั้นจะทำการเติมส่วนผสมทั้งหมดแบบต่อเนื่องพร้อมกัน จากนั้นเมื่อได้ของผสมออกมาจากหัวรีด ก็นำไปตัดเม็ดโดยเครื่องตัดเม็ดต่อไป

2.4 เทคนิคการตรวจสอบคุณลักษณะ และ การทดสอบ ขึ้นทดสอบตัวอย่าง

2.4.1 การหาความหนืดของสารละลายเจือจาง(Dilution Viscometry)

ในการทดลองหาค่า น้ำหนักโมเลกุลของพอลิคาร์บอเนตที่ผ่านการหลอม และ บดผสม เครื่องมือบดผสมชนิดต่างๆ เพื่อตรวจสอบการลดลงของค่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิคาร์บอเนต อันเนื่องจากการเสื่อมสลาย โดย ความร้อน แรงเฉือน หรือ ปฏิกิริยา ที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างการบดผสม การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิคาร์บอเนตแบบน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยค่าความหนืด(Average Viscosity Molecular Weight, \bar{M}_v) โดยทำการทดลองหาความหนืดภายใน(Intrinsic Viscosity, $[\eta]$) ก่อน โดยใช้เทคนิคการหาค่าเวลาการไหลของสารละลายเจือจาง เพื่อวัดค่าความหนืดของสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของบริษัท สก็อต เจอเรท จำกัด รุ่น AVS 360 และ ใช้หลอดแก้วแคปปีลาไรชนิด Ubbelohde ในการทดลอง

หลอดแก้วแคปปีลาไรชนิด Ubbelohde ที่ใช้เป็นหลอดที่มีความจุขนาด 20 มิลลิลิตร อุณหภูมิ การทดลอง ควบคุม โดยใช้อ่างน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และ ทำการวัดความหนืดของ สารละลายพอลิคาร์บอเนตในตัวทำละลาย THF ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 4 ค่า คือ เริ่มต้นที่ 1.000%w/v จากนั้นเจือจางด้วยตัวทำละลาย เพื่อให้ความเข้มข้นลดลงเป็น 0.500% 0.250% และ 0.125% ตามลำดับ โดยในการเตรียมสารละลายพอลิคาร์บอเนตเริ่มต้นจะเตรียมในขวดวัดปริมาตร ขนาด 10.00 มิลลิลิตร และ ทำการถ่ายสารละลายลงในหลอดแก้วแคปปีลาไร และ ทิ้งไว้ให้ อุณหภูมิสมดุลเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการวัดเวลาของการไหลของสารละลายเป็นจำนวน 3 ครั้ง

แล้วนำค่าเฉลี่ยของเวลาการไหลที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาความหนืดภายใน ของพอลิเมอร์ต่อไป ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลโดยความหนืด ของพอลิคาร์บอเนตสามารถคำนวณได้จากสมการของ Mark-Houwink-Sakurada แสดงดังสมการที่ 2.2 คือ

$$[\eta] = KM\bar{v}^a \quad (2.2)$$

โดยที่ ค่า K และ a เป็นค่าคงที่ และ สำหรับสารละลายพอลิคาร์บอเนตกับตัวทำละลาย THF ที่อุณหภูมิในการทดลองคือ 25 องศาเซลเซียสนั้น ค่า K และ a มีค่าเท่ากับ 0.00399 มิลลิลิตร ต่อ กรัม และ 0.70 มิลลิลิตร ต่อ กรัม ตามลำดับ

2.4.2 การทดสอบอุณหภูมิการบิดงอ(Heat Distortion Temperature Testing)

ในการทดลองหาค่าอุณหภูมิการบิดงอ(Heat Distortion Temperature, HDT) ของชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM D648 ซึ่งใช้เครื่องมือทดสอบของ บริษัท ATLAS รุ่น Manual DTUL/VICAT โดยใช้แรงกดมาตรฐาน ที่คำนวณจากน้ำหนักกดที่ 1,820 กิโลปาสกาล(kPa) หรือ 264 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว(psi) และ ใช้ของเหลวซิลิโคนเป็นตัว นำความร้อน ที่อัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ต่อ ชั่วโมง สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบเตรียมขึ้น โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาดความยาว 127 มิลลิเมตร ความกว้าง 4 มิลลิเมตร และ หนาเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ทำการทดสอบครั้งละ 3 ชิ้นทดสอบ ภายใต้ น้ำหนักกด ซึ่งคำนวณจากขนาดของชิ้นทดสอบ บันทึกค่าอุณหภูมิการบิดงอ เมื่อชิ้นทดสอบงอตัวลงเนื่องจากน้ำหนักกด ไปเป็นระยะเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร โดยอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ของแต่ละชิ้นทดสอบ

2.4.3 การทดสอบแรงต้านการตกกระแทก (Izod Impact Testing)

ในการศึกษาวิจัย ได้ทำการทดสอบแรงต้านการกระแทกแบบ “Izod” โดยใช้เครื่องมือทดสอบของ ATLAS รุ่น Basic Pendulum Impact: BPI โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM D256 วิธีการทดสอบ A สำหรับพลังงานสูงสุดใช้ในการตกกระแทกเท่ากับ 5.4 จูล ชิ้นทดสอบไม่ผ่านการทำรอยบาก ชิ้นทดสอบเตรียมโดยการฉีดขึ้นรูปเป็นแท่งสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความหนา 12.7 มิลลิเมตร ความยาว 64 มิลลิเมตร และ ความกว้าง 4 มิลลิเมตร โดยใช้จำนวนชิ้นในการทดสอบ 10 ชิ้น หาค่าเฉลี่ยโดยการตัดค่าที่มากที่สุด และ น้อยที่สุด จากการทดสอบออก แล้วนำ

ค่าที่เหลือไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย หาค่าด้วย พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ เพื่อบันทึกเป็นค่าความสามารถในการรับแรงกระทำของชิ้นทดสอบที่ได้ ในหน่วยของ กิโลจูลน ต่อ ตารางเมตร (kJ/m^2)

2.4.4 การทดสอบแรงดัดโค้งงอ และ ความแข็งแรงต่อ แรงดึง(Flexural and Tensile Testing)

ในการทดสอบแรงดัดโค้งงอ โดยใช้เครื่องมือทดสอบของ Instron™ Universal Testing รุ่น 5565 ตามวิธีการทดสอบมาตรฐานของ ASTM D5943 โดยใช้หัววัดทดสอบแบบ 3 จุด กดลงบนชิ้นทดสอบ และ ทำการวัดบันทึก คุณสมบัติของชิ้นทดสอบ 3 ค่าคุณสมบัติ คือ แรงกดสูงสุด (Maximum Load) ความเค้นสูงสุด(Maximum Stress) และ ค่าโมดูลัสแรงดัดโค้งงอ(Flexural Modulus) โดยใช้โหลดเซลล์(Load Cell) ขนาด 5 กิโลนิวตัน(kN) อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ต่อ นาที โดยมีระยะห่างระหว่างจุดกด(Span Length) บริเวณริมชิ้นทดสอบเท่ากับ 72 มิลลิเมตร ซึ่งคำนวณจากขนาดของชิ้นทดสอบตามวิธีมาตรฐานที่กล่าวมาข้างต้น ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ เตรียมโดยการฉีกขึ้นรูปขนาดเท่ากับชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ อุณหภูมิการบดงอ ในหัวข้อ 2.4.2

สำหรับการทดสอบการทนต่อแรงดึงของชิ้นทดสอบ ใช้เครื่องมือทดสอบเครื่องเดียวกันกับการทดสอบแรงดัดโค้งงอ แต่เปลี่ยนหัวทดสอบจากหัวกด 3 จุด เป็นหัวจับชิ้นทดสอบ ทำการทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D638 และ ทำการวัดบันทึกค่าคุณสมบัติของการทดสอบทั้งหมด 3 ค่า คือ ความเค้นการดึง(Tensile Stress) ความเครียด ณ จุดคราก(Strain at Break) และ โมดูลัสของยัง (Young's Modulus, E) โดยใช้อัตราเร็วในการดึงยึดชิ้นทดสอบเท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อ นาที สำหรับชิ้นทดสอบแบบกระดุก(Drum Bell) ที่ใช้การทดสอบเตรียมจากการฉีกขึ้นรูป มีขนาดความกว้างของส่วนแคบ 13 มิลลิเมตร ความกว้างทั้งหมด 20 มิลลิเมตร ความยาวส่วนแคบ 60 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมด 165 มิลลิเมตร และ ความหนาเท่ากับ 3.7 มิลลิเมตร ส่วนระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นทดสอบ และ ความยาวส่วนที่ทำการวัด(Gauge Length) ของชิ้นทดสอบเท่ากับ 115 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ในการทดสอบแรงดัดการ โค้งงอ และ การทนต่อแรงดึงยึด จะ ใช้จำนวนชิ้นทดสอบในการทดสอบอย่างละ 5 ชิ้นทดสอบในแต่ละตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

2.4.5 การวิเคราะห์ขนาดเส้นใย(Fiber Length Analysis)

ในการทดสอบวัดขนาดของเส้นใยโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาค(Particle Size Analysis) ของบริษัท เมคิทอป จำกัด รุ่น Mastersizer S เพื่อตรวจสอบขนาดของเส้นใยภายหลังจากที่ทำการบดผสม กับ พอลิคาร์บอเนตแล้ว วัดอุปสรรคในการทดลองนี้เพื่อ เปรียบเทียบขนาดของเส้นใยก่อน และ หลังจากการบดผสม กับ พอลิเมอร์ เมื่อมีการใช้ขนาดของเส้นใยเริ่มต้น ก่อนการบดผสมที่ขนาดแตกต่างกัน เส้นใยที่จะนำไปวิเคราะห์ขนาด เตรียมโดยการทำการละลายของพอลิเมอร์ผสมด้วยตัวทำละลาย THF เพื่อละลายพอลิคาร์บอเนต จากนั้นนำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40 เพื่อกรองเฉพาะส่วนของเส้นใยออกจากสารละลายพอลิคาร์บอเนต แล้ว นำเส้นใยที่ได้ไปล้างด้วยตัวทำละลาย THF หลายครั้ง แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง

นำเส้นใยที่แยกออกมาได้ ไปทำให้เกิดการกระจายตัว ในสารของเหลวที่ช่วยในการกระจายตัว ตามชนิดของเส้นใย ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 2.2 ผลการวิเคราะห์ของกราฟการกระจายตัวของขนาดเส้นใย จะนำไปหาค่าความยาวของเส้นใยเฉลี่ย

นอกจากเทคนิคการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคแล้ว กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเดี่ยวของบริษัทนิคอน รุ่น Eclips E660 POL ยังได้นำมาใช้ในการส่องเพื่อวัดขนาดความยาวของเส้นใย เพื่อเป็นการยืนยัน ผลที่ได้จากเทคนิค การขนาดอนุภาคที่ได้กล่าวมาแล้ว

2.4.6 เครื่องมือฉีดขึ้นรูป(Injection Molding Machine)

การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องมือฉีดขึ้นรูปเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ เพื่อนำไปเป็นชิ้นทดสอบตามที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งใช้เครื่องมือฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ จากบริษัท ซวน หลี ฟา จำกัด รุ่น CLE-80T โดยที่อุณหภูมิการหลอมเม็ด ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน มีค่า ณ ตำแหน่งกรวยการป้อนของผสมจนถึงหัวฉีดเท่ากับ 270 280 280 และ 290 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยใช้แผ่นความร้อน และ อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิจากอ่างของเหลวซิลิโคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนหมุนของเครื่องฉีดเท่ากับ 35 มิลลิเมตร และ มีค่าอัตราส่วนความยาว ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30

สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบแบบแท่งสี่เหลี่ยมขนาดหนา 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 ช่องการฉีดต่อ แม่พิมพ์ มีการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ของการฉีดขึ้นรูปดังต่อไปนี้ ความเร็วในการฉีดเท่ากับ 82 ลูกบาศก์เซนติ เมตร ต่อวินาที ความดันในการฉีดเท่ากับ 1,520 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร ความดันแม่พิมพ์(Holding Pressure)เท่ากับ 640 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร เวลาในการป้อนพอลิ

เมอร์เหลวเท่ากับ 10 วินาที เวลาในการฉีดเท่ากับ 6 วินาที เวลาในการฉีดช้าเท่ากับ 5 วินาที เวลาในการหล่อเย็นแม่พิมพ์เท่ากับ 20 วินาที เวลาในการเปิดแบบเท่ากับ 10 วินาที และ ได้น้ำหนักของชิ้นทดสอบแบบแท่งสี่เหลี่ยมเท่ากับ 8.0 กรัม

สำหรับการฉีดเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบแบบกระดูก และ แผ่นสี่เหลี่ยมบาง มีการตั้งค่าตัวแปรของการฉีดขึ้นรูป ดังต่อไปนี้ ความเร็วในการฉีดเท่ากับ 46 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อ วินาที ความดันในการฉีดเท่ากับ 1,200 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร ความดันช้าเท่ากับ 1,200 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร เวลาในการป้อนพอลิเมอร์เหลวเท่ากับ 15 วินาที เวลาในการฉีดเท่ากับ 6 วินาที เวลาในการฉีดช้าเท่ากับ 5 วินาที เวลาในการหล่อเย็นแม่พิมพ์เท่ากับ 20 วินาที เวลาในการเปิดแบบ เท่ากับ 10 วินาที จะได้น้ำหนักของชิ้นทดสอบแบบกระดูกเท่ากับ 10.8 กรัม

แต่อย่างไรก็ตามในการฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่มีการเติมสาร อีพอกซีที่ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยทำให้เข้ากันได้ดี ระหว่างพอลิคาร์บอเนต กับ เส้นใย ทั้งชิ้นทดสอบแบบแท่งสี่เหลี่ยม และแบบกระดูก อุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปต้องลดลงเหลือเท่ากับ 230 240 240 และ 250 องศาเซลเซียส ตั้งแต่บริเวณกรวยป้อนวัสดุ จนถึง หัวฉีด ตามลำดับ

บทที่ 3

ผลการทดลอง และ การวิเคราะห์ผล

3.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดของพอลิคาร์บอเนต

เมื่อพอลิคาร์บอเนตผ่านเครื่องบดผสมชนิดต่างๆ ความเป็นไปได้ที่พอลิเมอร์จะเกิดการสลายตัวของโซ่ อันเนื่องมาจากความร้อน และ แรงเฉือนจากเครื่องมือผสมเหล่านั้น ฉะนั้นการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโซ่พอลิคาร์บอเนตโดยติดตามค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด (Viscosity Average Molecular Weight, \bar{M}_v) เมื่อผ่านเครื่องมือผสมที่ใช้ในการทดลองจึงมีความจำเป็น ผลการตรวจสอบการลดลงของความยาวโซ่ แสดงสรุปในตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการหาความหนืดของสารละลายการเจือจาง ซึ่งวิธีการทดลองได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.4.1 ในบทที่ 2 และ วิธีการคำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดแสดงในภาคผนวก ก

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดเปรียบเทียบกับเครื่องบดผสมทั้งหมด พบว่า เมื่อพอลิคาร์บอเนตที่ผ่านเครื่องผสมแบบภายใน จะเห็นว่าค่าลดลงมากที่สุด คือ 35.35% โดยที่น้ำหนักโมเลกุลลดลงจาก 32,137 กรัม ต่อ โมล เหลือ 20,775 กรัม ต่อ โมล และ เมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีอีพอกซีผสมลงไป ในพอลิคาร์บอเนต กับ ระบบที่ไม่มีการเติม อีพอกซีลงไป จะเห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลที่มีการเติมอีพอกซีลงไป จะลดลงมากกว่า ระบบที่ไม่มีอีพอกซี สำหรับทุกเครื่องมือผสม ทั้งที่ อุณหภูมิในการบดผสมของระบบที่มีอีพอกซีต่ำกว่า ระบบที่ไม่มีอีพอกซี และ ค่าแรงเฉือนก็น่าจะต่ำกว่า สำหรับระบบที่เติม อีพอกซีลงไป เพราะ อีพอกซีที่เติมลงไป เป็นระบบที่มีการเติม ปริมาณตัวทำแข็ง ต่ำกว่า ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ (Stoichiometric Ratio) หรือ ค่า phr ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยากัน จะได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโซ่กิ่งขนาดสั้น (Short Branched Chain) แทนที่จะได้โซ่ร่างแห เหมือนกรณี ที่เติมตัวทำแข็งในปริมาณอัตราส่วนสมมูลย์ ซึ่งโซ่กิ่งขนาดสั้น ย่อมมีค่าความหนืดต่ำกว่า โซ่แบบร่างแห และ โซ่ตรงขนาดยาวกว่าของพอลิคาร์บอเนต ดังนั้นระบบอีพอกซีที่เติมลงไป จึงน่าจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) ให้กับระบบการผสม และ น่าจะทำให้โซ่พอลิคาร์บอเนต สลายตัวได้ยากขึ้นด้วย แต่ผลการทดลองที่ได้ต่างจากสมมุติฐาน ที่ได้ ทำให้สามารถอธิบายได้อีกประเด็นหนึ่ง ก็ คือ ระบบอีพอกซีที่เติมลงไป จะไปทำปฏิกิริยากับโซ่พอลิคาร์บอเนต บางส่วน ทำให้โซ่ขนาดสั้นลง ดังมีหลักฐานการศึกษาที่ได้มีการตีพิมพ์มาแล้ว ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 1 ที่ผ่านมา

ตารางที่ 3.1 แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติม และ
ไม่มีการเติมอีพอกซีแข็ง

พอลิคาร์บอเนต	$[\eta]$	\bar{M}_v (g/mol)	%
พอลิคาร์บอเนตเริ่มต้น	0.57	32,137	0.00
เครื่องผสมแบบภายใน:			
ไม่เติมอีพอกซี	0.42	20,775	-35.35
เติมอีพอกซี	0.40	19,275	-39.71
เครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว:			
ไม่เติมอีพอกซี	0.54	29,748	-7.43
เติมอีพอกซี	0.53	28,964	-9.87
เครื่องผสมแบบแกนคู่:			
ไม่เติมอีพอกซี	0.53	28,964	-9.87
เติมอีพอกซี	0.49	25,893	-19.43
เครื่องฉีดขึ้นรูปชั้นทดสอบ:			
ไม่เติมอีพอกซี	0.46	23,658	-26.38
เติมอีพอกซี	0.42	20,775	-35.35

3.2 ผลการวิเคราะห์ความยาวเส้นใย

จากการทดลองวิเคราะห์หาความยาวของเส้นใยทั้ง 3 ชนิด ภายหลังจากการบดผสม กับ พอลิ คาร์บอเนต โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาด และ ยืนยันโดยการวัดค่าความยาวโดยวัดขนาดภายใต้ กล้องจุลทรรศน์ เพื่อเปรียบเทียบขนาดของเส้นใยก่อน และ หลัง การบดผสม กับ พอลิคาร์บอเนต เมื่อเริ่มต้นใช้ขนาดของเส้นใยก่อนทำการผสมแตกต่างกัน ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงสรุปในตารางที่

3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปผลการวิเคราะห์ขนาดความยาวของเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน ภายหลังจากการบดผสม กับ พอลิคาร์บอนเนตในเครื่องผสมแบบภายใน ที่ปริมาณการใช้เท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก

ความยาวเส้นใยเริ่มต้น (มิลลิเมตร)	ความยาวเส้นใยหลังบดผสม(มิลลิเมตร)		
	เส้นใยแก้ว	เส้นใยเคฟลา	เส้นใยคาร์บอน
4	0.049	0.133	0.131
6	0.050	0.134	0.131
8	0.051	0.139	0.131
ค่าเฉลี่ย	0.050	0.136	0.131

ผลการทดลองจากตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่า ความยาวเส้นใยในส่วนผสมของพอลิคาร์บอนเนตผสม ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าขนาดความยาวเส้นใยเริ่มต้นที่เติมลงไป โดยที่ความยาวของเส้นใยหลังจากทำการบดผสม กับ พอลิคาร์บอนเนตจะมีค่าความยาวคงที่ ไม่ว่าจะใช้เส้นใยที่เติมลงไปให้มีความยาวเพิ่มขึ้น จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ ทำให้ในการทดลองนี้ จึงใช้ความยาวเส้นใยก่อนผสมของเส้นใยทั้ง 3 ชนิดเท่ากัน คือเท่ากับ 8 – 10 มิลลิเมตร เนื่องจากสะดวกต่อการเตรียมโดยการใช้กรรไกรตัด และ ผลการวิเคราะห์ความยาวเส้นใยหลังจากบดผสม กับ พอลิคาร์บอนเนต ของของผสมที่ผ่านการผสมโดยเครื่องมือบดผสมแบบต่างๆ สรุปดังตารางที่ 3.3

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า ความยาวเส้นใยหลังผสม มีค่า ลดลงมากที่สุด เมื่อใช้เครื่องผสมแบบภายใน และ ลดลงรองลงมาเมื่อ ใช้เครื่องบดผสมแบบแกนคู่ และ แกนเดี่ยว ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ที่ได้กล่าวมาแล้วคือ เครื่องบดผสมแบบภายใน จะมีแรงเฉือนมากที่สุด และ เฉือนทำให้เส้นใย เคสสั้นลงมากที่สุด ส่วนเครื่องรีดบดผสมแบบแกนคู่ และ แกนเดี่ยวซึ่งมีแรงเฉือน ลดลงตามลำดับ ก็จะเฉือนให้เส้นใยขาดไม่มาก เมื่อเทียบกับเครื่องบดผสมแบบภายใน จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบความยาวเส้นใยหลังบดผสม ของระบบที่ไม่มีการเติมอีพอกซีเป็นสารช่วยในการเข้ากัน กับ ระบบของผสมที่มีการเติมอีพอกซีลงไป จะเห็นว่าระบบที่มีการเติมอีพอกซี จะช่วยให้เส้น ใยมีขนาดเส้น ใยที่ยาวกว่า ระบบที่ไม่มีการเติม ซึ่งอธิบายได้ว่า ระบบอีพอกซีที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น และ ช่วยลดแรงเฉือน ทำให้เส้นใยที่บดผสม ยังมีขนาดเส้น ใยที่ยาวอยู่ และ เมื่อมีปริมาณเส้น ใยที่ทำการผสมเติมลงไปมากขึ้น ขนาดเส้น ใยมีค่าลดลงตามปริมาณการเติมที่มากขึ้น เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าปริมาณเส้น ใยมีมากขึ้น ไม่ได้ทำให้ความหนืดของของผสม มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้แรงเฉือน ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วย จากผลการทดลองที่ได้ ทำให้เราสรุปเบื้องต้นได้ว่า เครื่องบดผสมแบบภายใน จะมี

แรงเฉือนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเครื่องรีดผสม และทำให้เส้นใยเกิดการขาดออกเป็นเส้นใยขนาดสั้น ระบบอีพอกซีที่เติมลงไปนอกจากอาจจะช่วยให้เกิดการเข้ากันได้ระหว่าง เส้นใย กับ พอลิเมอร์แล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นช่วยลดแรงเฉือนในเครื่องมือผสม อีกด้วย ทำให้เส้นใยขาดสั้นไม่มากนัก เมื่อเทียบกับ ระบบที่ไม่ได้เติมอีพอกซี นอกจากนั้นผลการทดสอบยัง ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของ ปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป จาก 5% ไปจนถึง 15% โดยน้ำหนัก ไม่ได้ทำให้ความหนืดของของผสม เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน ภายหลังจากบดผสม กับ พอลิคาร์บอนเนตทั้งที่ใช้ และ ไม่ใช้อีพอกซีเป็นสารที่ช่วยให้เข้ากันได้

ส่วนผสม (%w/w)		เครื่องผสมแบบภายใน ¹ (มิลลิเมตร)		เครื่องผสมแบบแกนคู่ ² (มิลลิเมตร)		เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยว ² (มิลลิเมตร)	
		ไม่เติม	เติม	ไม่เติม	เติม	ไม่เติม	เติม
PC:GF 8 mm	95: 5	0.051	0.072	0.460	0.490	2.050	2.260
	90:10	0.049	0.068	0.420	0.450	1.730	2.120
	85:15	0.049	0.067	0.340	0.420	1.700	1.980
PC:KF 8 mm	95: 5	0.139	0.159	0.480	0.510	2.420	2.530
	90:10	0.136	0.154	0.450	0.490	2.140	2.410
	85:15	0.134	0.151	0.400	0.430	2.030	2.290
PC:CF 8 mm	95: 5	0.131	0.149	0.450	0.510	1.990	2.180
	90:10	0.130	0.148	0.420	0.460	1.930	2.060
	85:15	0.143	0.145	0.310	0.430	1.600	1.930

¹วิเคราะห์ความยาวของเส้นใยโดยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

²วิเคราะห์ความยาวของเส้นใยโดยกล้องจุลทรรศน์

3.3 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอนเนต และ พอลิคาร์บอนเนตที่มีการใช้ระบบอีพอกซีเป็นสารช่วยให้ผสมเข้ากัน

คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบพอลิคาร์บอนเนตที่มีการเติม และ ไม่มี การเติมระบบอีพอกซีผสมไปในอัตราส่วน 1% โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 3.4(a) และ 3.4(b) และ จากการสังเกตลักษณะชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ พบว่า ชิ้นงานที่เตรียมได้มี

ลักษณะใส คล้ายกับชิ้นงานของพอลิคาร์บอเนตที่ไม่ได้ผสมระบบอีพอกซี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ กับ ระบบอีพอกซี มีการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน(Miscible Blends) และเมื่อนำข้อมูลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 3.4(a) และ 3.4(b) ไปพลอตกราฟ โดยให้แกนตั้งเป็นแกนตั้งเป็นค่าอัตราส่วนแบบปรับปกติ(Normalized Axis) โดยใช้ค่าผลการทดสอบ จากชิ้นงานพอลิคาร์บอเนตที่ผ่านเครื่องบดผสมแบบแกนคู่ เป็นค่าอ้างอิง คิดคำนวณเป็น 100% หรือเท่ากับ 1.0 จะได้กราฟดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าอุณหภูมิการบิดงอของพอลิคาร์บอเนตผ่านเครื่องมือบดผสมชนิดต่างๆ มีค่าเท่ากับ 138°C ส่วนชิ้นงานพอลิเมอร์ที่มีการผสมระบบ อีพอกซีลงไป 1% จะมีค่า HDT ลดลง โดยเฉลี่ย 6 องศาเซลเซียส คือมีค่าอยู่ระหว่าง 131 – 133°C ซึ่งเป็นไปตามความคาดหมาย เนื่องจาก ระบบอีพอกซีที่เติมลงไป จะเกิดปฏิกิริยาได้เป็น พอลิเมอร์ที่เป็น แบบโซ่กิ่ง และ มีค่า HDT ที่ต่ำกว่าพอลิคาร์บอเนต และ เมื่อผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกับ พอลิเมอร์ จะทำให้ค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสม(Polymer Blends) มีค่าลดลง ตามคำอธิบายโดยสมการฟอกซ์(Fox's Equation) ที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงต้านแรงตกกระแทก โดยพลังงานตกกระแทก 5.4 จูล พบว่า ชิ้นงานไม่แตกหัก ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าตัวเลขความแข็งแรงต้านการตกกระแทกได้ ส่วนค่าความแข็งแรงด้านการค้ำงอ โดยใช้วิธีทดสอบแบบ 3 จุด เพื่อทดสอบความเหนียว ของวัสดุ จากผลการทดสอบพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าความเหนียวของชิ้นงาน พอลิคาร์บอเนต ที่ถูกบดผ่านเครื่องบดผสมชนิดต่างๆ มีค่าโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนักคือ มีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 98 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ เนื่องมาจากแรงเฉือน ดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา มีผลต่อค่าความแข็งแรงเหนียวของพอลิเมอร์ ไม่นักนัก เช่นเดียวกับค่าการทดสอบจากตัวอย่างที่ผสมระบบ อีพอกซีลงไป พบว่า ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ทุกวิธีการบดผสม และ ไม่แตกต่างจากค่าที่ทดสอบได้จาก พอลิเมอร์ที่ไม่ผสม อีพอกซี ยกเว้น ตัวอย่างที่เตรียมจากวิธีบดผสมที่ 3 ซึ่ง ใช้ในรูปพอลิเมอร์ผสมความเข้มข้นสูง(Master Batch) จากเครื่องบดผสมแบบภายใน แล้วทำให้เจือจางลงในเครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว ที่มีค่าความแข็งแรงเหนียวลดลงอย่างเห็น ได้ชัดเจน คือมีค่าลดลงโดยประมาณ 5% เมื่อเทียบกับ พอลิคาร์บอเนตที่ไม่ผสม ระบบอีพอกซี ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการลดลงของความยาวโซ่พอลิเมอร์ที่ลดลงอย่างมากเนื่องจาก ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมา ได้ผ่านเครื่องจักรบดผสม 2 เครื่องจักร และ ต้องถูกหลอมละลายในเครื่องฉีดขึ้นรูปในขั้นตอนการเตรียมขึ้นทดสอบด้วย และ จากข้อมูลที่รายงานในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าพอลิคาร์บอเนต ที่ผสม กับ สารอีพอกซี จะมีการลดลงของความยาวสายโซ่ มากกว่า พอลิเมอร์ที่ไม่มี อีพอกซีผสมอยู่ อีกด้วย

ตารางที่ 3.4(a) สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนต(PC) และ พอลิ คาร์บอเนตผสมอีพอกซี(PC+Epoxy) ที่ผสมโดยวิธีการผสมแบบต่างๆ

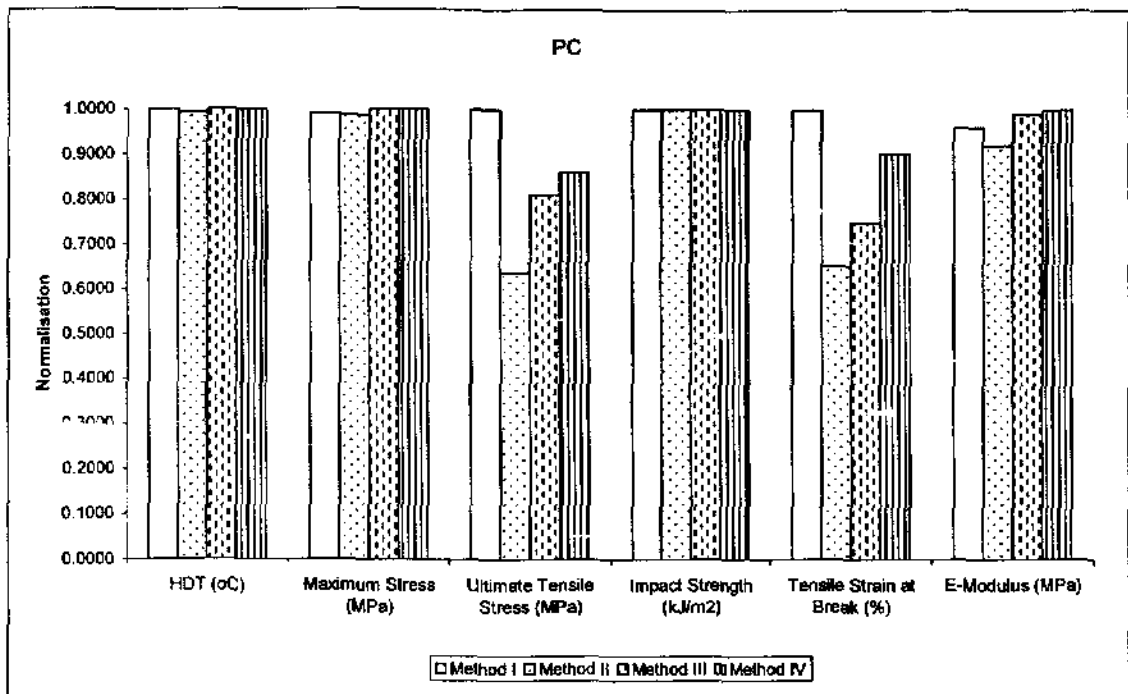
คุณสมบัติ	วิธีการผสมวิธีที่ 1		วิธีการผสมวิธีที่ 2	
	PC	PC+Epoxy	PC	PC+Epoxy
อุณหภูมิการบิดงอ(HDT, °C)	138±0.0	133±0.0	137±0.6	132±0.6
แรงต้านการกระแทก(kJ/m ²)	na*	na*	na*	na*
ความเค้นการดัดงอ(MPa)	98±1.7	99±3.9	97±1.5	99±0.5
ความเค้นการดึงยึด(MPa)	67±0.7	68±0.5	43±2.6	55±5.5
ความเครียด ณ จุดคราก(%)	12±0.5	12±0.4	8±0.4	9±0.8
ค่าโมดูลัสของยัง(MPa)	940±22.6	957±40.8	901±14.4	963±9.9

*ชิ้นทดสอบไม่หักที่พลังงานการตกกระแทก 5.4 จูล

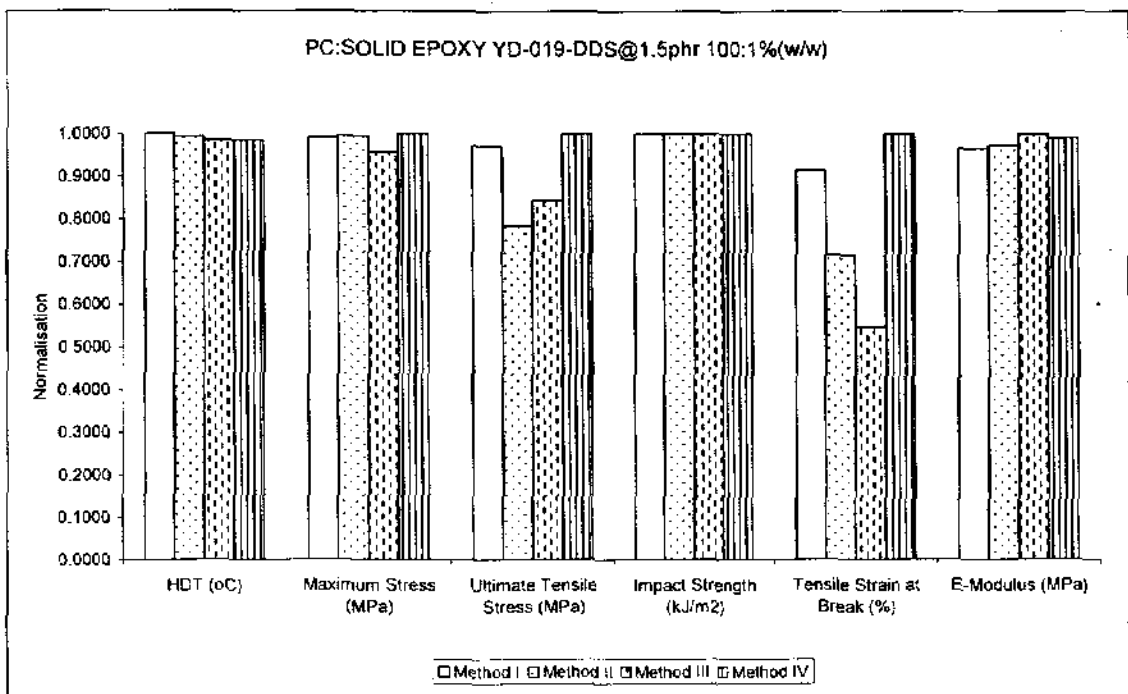
ตารางที่ 3.4(b) สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนต(PC) และ พอลิ คาร์บอเนตผสมอีพอกซี(PC+Epoxy) ที่ผสมโดยวิธีการผสมแบบต่างๆ

คุณสมบัติ	วิธีการผสมวิธีที่ 3		วิธีการผสมวิธีที่ 4	
	PC	PC+Epoxy	PC	PC+Epoxy
อุณหภูมิการบิดงอ(HDT, °C)	138±0.6	131±0.6	138±0.6	131±0.6
แรงต้านการกระแทก(kJ/m ²)	na*	na*	na*	na*
ความเค้นการดัดงอ(MPa)	99±1.3	95±0.8	99±1.7	100±0.3
ความเค้นการดึงยึด(MPa)	55±0.6	58±3.0	58±0.7	70±0.2
ความเครียด ณ จุดคราก(%)	9±0.4	7±0.5	10±1.4	12±0.4
ค่าโมดูลัสของยัง(MPa)	968±25.4	991±28.0	978±9.8	981±10.1

*ชิ้นทดสอบไม่หักที่พลังงานการตกกระแทก 5.4 จูล



รูปที่ 3.1 กราฟแท่งเปรียบเทียบคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต



รูปที่ 3.2 กราฟแท่งเปรียบเทียบคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตที่มีอีพอกซีเป็นสารช่วยให้ผสมเข้ากัน

ส่วนความแข็งแรงต่อการดึงยึด ที่อยู่ในค่าความเค้นสูงสุด ความเครียด ϵ จุดคราก และ ค่าโมดูลัสของ ยัง พบว่า ค่าความเค้นแรงดึง ของพอลิเมอร์ที่มี อีพอกซีผสมลงไป จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับ ของพอลิเมอร์ที่ไม่มี อีพอกซีผสม สำหรับทุกๆ วิธีการผสม เช่นเดียวกับค่า ความเครียด ϵ จุดครากตัว และ ค่าโมดูลัสของ ยัง ซึ่งจากผลการทดสอบ ทำให้อธิบายได้ว่า ระบบอีพอกซีที่เติมลงไป ผสมเข้ากับพอลิคาร์บอเนตเป็นเนื้อเดียวกัน และ ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ มีความเหนียวทนต่อแรงดึงยึดได้เพิ่มมากขึ้น

3.4 คุณสมบัติเชิงกล และ เชิงกลทางความร้อน ของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยสังเคราะห์แบบแกนคู่

จากผลการศึกษา ที่ผ่านมา เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสม พอลิคาร์บอเนต กับ ระบบอีพอกซี นั้น พบว่าการใช้เครื่องผสมแบบแกนคู่ ทำให้คุณสมบัติของ พอลิเมอร์ผสม ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติที่ดี เมื่อเทียบกับวิธีการผสมพอลิเมอร์ แบบอื่น เนื่องจากทำให้ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ดี และ มีค่าแรงเฉือนน้อย ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์คงเดิม หรือ ขนาดของโซ่ลดลงน้อยที่สุด ดังนั้นจึงใช้วิธีการผสมดังกล่าว เพื่อเป็นเครื่องมือผสม เพื่อศึกษาการเตรียมพอลิคาร์บอเนต เสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรง ชนิดสั้น โดยมีระบบอีพอกซีเป็นสารช่วยในการผสมเข้ากันได้(Compatibilizer) โดยศึกษาาระบบเส้นใยเสริมแรง 3 ชนิด คือ เส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน ตามลำดับ

3.4.1 เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว

จากการศึกษาทดลองผสมเส้นใยแก้ว กับ พอลิคาร์บอเนต ใน 2 ระบบ คือ ระบบที่มีการใช้อีพอกซี และ ระบบที่ไม่มีการใช้อีพอกซี เป็นสารช่วยให้เส้นใยกับพอลิคาร์บอเนตผสมเข้ากันได้ดี โดยใช้เครื่องมือในการผสมแบบแกนคู่ ได้ผลการศึกษาดังสรุปในตารางที่ 3.5 ซึ่งเป็นผลการทดสอบพอลิคาร์บอเนตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ปริมาณเส้นใย 5% 10% และ 15%ซึ่งมีการเติม และ ไม่เติมระบบอีพอกซี เมื่อ พิจารณาอุณหภูมิ HDT ของชิ้นทดสอบที่เตรียมจากพอลิคาร์บอเนต ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าค่า HDT มีค่าเพิ่มขึ้น กับ ปริมาณของเส้น ใยที่เพิ่มมากขึ้น แต่ เป็นการเพิ่มขึ้นอย่างไม่ค่อยมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับกับระบบที่มีการเติมอีพอกซี ลงไปในปริมาณ 1% ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เส้นใยแก้วที่เติมลงไปช่วยทำให้พอลิเมอร์ มีความสามารถในการรับแรงที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ ความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ก็ยังคงมาจากคุณสมบัติของพอลิเมอร์เป็นหลัก

ส่วนค่าความแข็งแรงด้านแรงกระแทก ของทั้ง 2 ระบบ พบว่าที่ปริมาณ 5% ของเส้นใยแก้ว ขึ้นทดสอบไม่หัก ด้วยพลังงานตกกระแทกที่ 5.4 จูล ส่วนชิ้นงานที่มีการเติมเส้นใยเสริมแรง มากกว่า 5% ขึ้นทดสอบจะหัก และมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก กับปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และ เมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเติม อีพอกซี และไม่ได้เติมอีพอกซี ลงไป พบว่าในระบบที่มีการเติม อีพอกซีลงไป ที่มีการใช้ปริมาณเส้นใย เท่ากัน จะมีค่ามากกว่า เล็กน้อย ซึ่งการลดลงของความสามารถในการรับแรงตกกระแทกของชิ้นงาน เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยมากกว่า 5% อาจจะเป็นเนื่องจาก ความสามารถในการผสม(Load Capacity) ของพอลิคาร์บอเนต มีจำกัด ทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเสริมแรง ลดลงก็ได้ ทำให้ความแข็งแรงเหนียวพอลิคาร์บอเนตลดลงด้วย

แต่เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงในการค้ำของชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านความแข็งแรงเหนียวของวัสดุ เมื่อ ได้รับแรงกดค้ำ อย่างช้าๆ ซึ่งต่างจากคุณสมบัติความแข็งแรง การด้านแรงตกกระแทก ซึ่งเป็นการตกกระแทก ชิ้นงาน อย่างเร็ว ดังนั้นเมื่อชิ้นงานมีรอยตำหนิเพียงเล็กน้อย ก็จะเกิดการแตกร้าวต่อเนื่อง(Crack Propagation) ไปอย่างรวดเร็ว จากผลการทดสอบความแข็งแรงเหนียวจากแรงค้ำของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 2 ระบบ พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ การเพิ่มขึ้นมิได้เพิ่มอย่างมีนัยสำคัญมากนัก ตามปริมาณของเส้นใยที่เติมลงไป และ เมื่อเปรียบเทียบระบบที่เติมอีพอกซี และไม่ได้เติม ที่ปริมาณเส้นใยแก้วเท่ากัน พบว่าระบบที่เติมอีพอกซีผสมลงไป มีค่ามากกว่า ระบบที่ ไม่ได้เติม โดยประมาณ 5% ซึ่งผลการทดสอบนี้ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กับค่าการทดสอบการทนทานต่อแรงดึงยึด ซึ่ง รายงานออกมาเป็นค่า ความเครียดสูงสุด ความเค้น ณ จุดคราก และ ค่าโมดูลัสของ ย้ง ยกเว้นค่า โมดูลัส ของ ย้ง ที่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ตามปริมาณของเส้นใยแก้ว ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ อาจจะอธิบายได้ว่า ผลของการเติมระบบอีพอกซีลงไปในการผสมพอลิเมอร์ กับเส้นใยแก้วเสริมแรง นั้น จะไปช่วยให้เกิดแรงยึดติดกันของใยแก้ว กับ พอลิคาร์บอเนต และ ทำให้ค่าความเหนียวของพอลิเมอร์เสริมแรง มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ การเติมเส้นใยในปริมาณมากเกินไป อาจจะทำให้ความสามารถในการผสม ถึงจุดอิ่มตัว และ เกิดช่องว่างระหว่าง พอลิเมอร์ กับ เส้นใย ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตก ได้ง่ายเมื่อมีแรงมาตกกระทบ อย่างฉับพลัน จากผลการทดสอบทั้งหมดเมื่อพิจารณาจากค่าตัวเลขที่ทดสอบได้ อาจจะสรุปในเบื้องต้นได้ว่า ปริมาณเส้นใยแก้วที่เหมาะสม ในการเสริมแรง พอลิคาร์บอเนต และ มีระบบอีพอกซีเป็นสารช่วยผสมเข้ากันได้ที่ 1% บดผสมโดยใช้เครื่องบดผสมแบบ 2 แกน คือ 15% โดย น้ำหนัก

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอนเนต เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว

คุณสมบัติทดสอบ	องค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม(โดยน้ำหนัก)					
	PC:GF			PC:GF:ES		
	95:5	90:10	85:15	95:5:1	90:10:1	85:15:1
ค่าอุณหภูมิการบิดงอ(°C)	135±1.0	137±0.0	138±0.6	136±0.0	136±0.6	137±0.0
ความแข็งแรงตกกระแตก(kJ/m ²)	unbreak	65.5±1.8	66.5±1.2	unbreak	76.4±1.6	79.3±0.3
ความแข็งแรงต่อแรงกดคด(MPa)	95.6±0.6	103.4±0.5	106.2±0.6	102.6±1.6	108.1±2.3	110.0±0.3
ความเครียดสูงสุด(MPa)	53±9	62±1	64±1	66±1	68±1	68±1
ความเค้น ณ จุดคราก(%)	9±2	9±0	9±0	10±0	10±1	10±0
โมดูลัสของยัง(MPa)	1146±37	1212±34	1240±54	1084±45	1165±67	1213±40

หมายเหตุ: GF = เส้นใยแก้ว(Glass Fiber) และ ES = ระบบอีพอกซี(Epoxy System)

3.4.2 เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลา

ตารางที่ 3.6 แสดงคุณสมบัติเชิงความร้อน และ คุณสมบัติเชิงกล ของพอลิคาร์บอนเนต เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลา 2 ระบบ คือ ระบบที่มีการใช้ และ ระบบที่ไม่มีการใช้อีพอกซี เป็นสารช่วยการผสมเข้ากันได้ดี จากตารางผลสรุปการทดสอบพบว่าอุณหภูมิการบิดงอ(HDT) เพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยเพิ่ม ทั้ง 2 ระบบของพอลิเมอร์ผสมเสริมแรง ซึ่งความชัดเจนของการเพิ่มขึ้นของค่า HDT ไม่ชัดเจนเหมือนกับ กรณีการใช้ เส้นใยแก้ว ซึ่งอาจจะเนื่องมาจาก เส้นใยเคฟลา มีคุณสมบัติเด่น เฉพาะเรื่อง ความเหนียว ไม่มีความโดดเด่นในเรื่องของความสามารถในการรับแรง เหมือนกับ เส้นใยแก้ว ดังนั้นเมื่อผสมเข้ากับพอลิเมอร์ จึงทำให้ความสามารถในการรับแรง กับ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้ดีขึ้นมากนัก

ความแข็งแรงต้านแรงตกกระแตก ของชิ้นงาน ที่เตรียมได้จาก 2 ระบบ พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ ใช้ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 10% แต่จะลดลงอย่างเช่น ได้ชัดเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย เป็น 15% และ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่เติม และ ไม่ได้เติม อีพอกซี ลงไป พบว่าระบบที่มีการเติม อีพอกซีลงไป จะมีค่าความแข็งแรงเหนียว มากกว่า เล็กน้อยเช่นเดียวกัน การที่ค่าความแข็งแรงเหนียวมีค่าลดลง เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็น 15 % อาจจะเป็นเนื่องจาก ปริมาณดังกล่าว เป็นปริมาณเกิน

ความสามารถของการบดผสม(Loading Capacity) ของพอลิคาร์บอเนต เนื่องจาก เส้นใยเคฟลา มีความหนาแน่นต่ำ มีค่าเพียง 1.44 กรัม ต่อ ลูกบาศก์มิลลิเมตร เท่านั้น ดังนั้น ค่าอัตราส่วนต่อปริมาตรของพอลิเมอร์ และ เส้นใย ก็มีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ เส้นใยชนิดอื่น โดยเฉพาะ เส้นใยแก้ว ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ผ่านมา จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ การผสม ที่จะทำให้ค่าความแข็งแรงดีขึ้น ได้เพียง 10% เท่านั้น สำหรับการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ของค่าความแข็งแรงเหนียว สำหรับระบบที่มีการเติมอีพอกซี ลงไปนั้น ก็ อธิบายได้เช่นเดียวกัน กับกรณีของเส้นใยแก้ว คือ อีพอกซีอาจจะไปช่วยให้ พอลิคาร์บอเนต ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น กับ เส้นใยเสริม แรง

ส่วนการทดสอบความแข็งแรง โดยการค้ำงอ ของ 2 ระบบนั้น มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ ค่าความแข็งแรง ด้านแรงดกกระแทก และ ผลการทดสอบยืนยันว่าที่ปริมาณเส้นใยเคฟลาที่เหมาะสมสำหรับ ผสมกับ พอลิคาร์บอเนต และ ใช้ ระบบอีพอกซี เป็น สารช่วยการบดผสม นั้นมีค่าเป็น 10% โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรง ต่อการดึงยึด ซึ่งแสดงโดยค่า ความเค้นสูงสุด ความเครียด ณ จุดคราก และ ค่าโมดูลัสของยัง พบว่า ค่าความเค้นสูงสุด มีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ ที่ 10% ของการผสม ค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ ค่าความเครียด ณ จุดคราก มีค่าลดลง กับปริมาณเส้นใย ที่เพิ่มขึ้น อย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนค่าโมดูลัสของยัง มีค่าเพิ่มขึ้น กับ ปริมาณเส้นใย จากผลการทดสอบที่ได้ ทำให้เราอาจจะอธิบายได้ว่า ความแข็งแรงทนทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ เส้นใยเคฟลา ลงไป โดยเฉพาะ ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ การผสม เกินกว่า 10% ขึ้นไป จะทำให้พอลิเมอร์ ผสมประมากรขึ้น โดยเห็นได้จากค่า ความเครียด ณ จุดคราก ที่ลดลง การ เติมอีพอกซีลงไป ไม่ได้ช่วยให้ พอลิเมอร์มีความแข็งแรง หรือ เหนียว มากขึ้น มากนัก ซึ่งอาจจะมีสาเหตุ มาจากความสามารถในการเพิ่มส่วนผสม ของพอลิคาร์บอเนต ดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้ ทำให้สามารถสรุปได้ในเบื้องต้นนี้ว่า ปริมาณเส้นใยเคฟลาที่สามารถ ผสมกับ พอลิคาร์บอเนต และ มีระบบอีพอกซีเป็นสารช่วยการผสมกันได้ดี โดยใช้เครื่องบดผสม ชนิด เกลียวคู่ จะอยู่ที่ 10% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอนเนต เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลา

คุณสมบัติทดสอบ	องค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม(โดยน้ำหนัก)					
	PC:KF			PC:KF:ES		
	95:5	90:10	85:15	95:5:1	90:10:1	85:15:1
ค่าอุณหภูมิการบิดงอ($^{\circ}\text{C}$)	134 \pm 1.0	135 \pm 0.0	136 \pm 1.0	133 \pm 0.6	134 \pm 0.6	135 \pm 1.0
ความแข็งแรงตกกระแทก(kJ/m^2)	68.6 \pm 1.3	72.3 \pm 2.8	49.6 \pm 2.4	50.3 \pm 2.0	69.2 \pm 2.0	32.7 \pm 2.3
ความแข็งแรงต่อแรงกดคด(MPa)	100.7 \pm 0.6	106.5 \pm 2.4	93.7 \pm 8.7	106.6 \pm 0.3	108.1 \pm 2.7	61.7 \pm 9.2
ความเครียดสูงสุด(MPa)	64 \pm 3	66 \pm 1	50 \pm 10	68 \pm 1	65 \pm 3	34 \pm 4
ความเค้น ณ จุดคราก(%)	9 \pm 1	8 \pm 0	5 \pm 0	10 \pm 1	9 \pm 2	4 \pm 1
โมดูลัสของยัง(MPa)	1063 \pm 40	1115 \pm 28	1169 \pm 61	1083 \pm 9	1016 \pm 53	1054 \pm 58

หมายเหตุ: KF = เส้นใยเคฟลา(Kevlar Fiber) และ ES = ระบบอีพอกซี(Epoxy System)

3.4.3 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน

ตารางที่ 3.7 เป็นตารางสรุปค่าคุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอนเนตเสริมแรงเส้นใยคาร์บอนทั้ง 2 ระบบ ที่เตรียมจากเครื่องบดผสมแบบแกนคู่ เช่นเดียวกันกับการเส้นใยชนิดอื่น ดังที่ผ่านมา ผลการทดสอบ ค่าอุณหภูมิการบิดงอ(HDT) ของพอลิเมอร์ผสม มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อ เพิ่มปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป จาก 5% ไปจนถึง 15% สำหรับระบบการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ที่ไม่ได้เติม อีพอกซีลงไป แต่ค่าจะลดลงอย่างชัดเจน สำหรับระบบที่มีการเติมอีพอกซีลงไป ในส่วนผสม เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย โดยค่าจะลดลงจาก 136°C เป็น 131°C โดยเฉลี่ย ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติเชิงกล อื่นๆ ซึ่งจะได้อธิบาย ต่อไป โดยที่ปริมาณเส้นใยที่ทำให้ค่า HDT มีมากที่สุดจะอยู่ที่ 5% โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงต้านแรงกระแทก และ ค่าความแข็งแรงต่อการคดคด ไปโดยกันนั้น จากค่าผลการทดสอบ พบว่าค่าการทดสอบสูงสุด เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเสริมแรงเท่ากับ 5% เช่นกัน ทั้งระบบที่เติม และ ไม่ได้เติม อีพอกซีลงไป โดยที่พอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติม อีพอกซีลงไป จะมีค่าสูงกว่าระบบที่มีการเติม อีพอกซี อย่างชัดเจน ยกเว้นค่าความแข็งแรงต่อการคดคด ซึ่งประเด็นของการลดลง กับ ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น นั้น อาจจะอธิบายด้วยความสามารถในการเข้ากันได้ที่ไม่ดี

ของเส้นใยคาร์บอน กับ พอลิคาร์บอนเนต เนื่องจากค่าความเป็นขั้วที่แตกต่างกันมาก ถึงแม้ว่าจะมีการเติมอีพอกซีลงไป ซึ่งน่าจะไปช่วยทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยคาร์บอน กับ พอลิคาร์บอนเนต ดีขึ้น เหมือนกับกรณีของการผลิตวัสดุเสริมแรง ที่ใช้ ระบบอีพอกซี ในวัสดุพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Composite Materials) โดยทั่วไป ซึ่งอาจจะมีข้อได้เปรียบกับผลการทดสอบในกรณีการใช้เส้นใยแก้วเสริมแรง ที่ผ่านมา ซึ่งเส้นใยแก้วเสริมแรงทั่วไป ก็มีความเป็นขั้วที่สูงเช่นกัน แต่ เส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดลองผสมในครั้งนี้ ได้มีการเคลือบด้วยสารเคลือบผิว(Sizing) ในกระบวนการผลิตเป็น สารตระกูลอีพอกซี ซึ่งก็ทำให้เข้ากันได้ดีกับระบบอีพอกซีที่เติมลงไปด้วย แต่เส้นใยคาร์บอนที่ใช้ ไม่มีการเคลือบผิวเส้นใยด้วยสารดังกล่าว จึงทำให้ความสามารถในการยึดติดไม่ได้ดีเท่าเส้นใยแก้ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมมากขึ้น ก็จะทำให้คุณสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งแรงเหนียวมีค่าลดลงไป ด้วย

สำหรับกรณีของค่าผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน จากค่าที่ทดสอบได้พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดของชิ้นทดสอบ จะอยู่ที่การใช้ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 5% และ มีแนวโน้มเหมือนกับคุณสมบัติค่าความแข็งแรงเหนียวที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนค่าความเครียด ณ จุดคราก และ ค่าโมดูลัสของยัง มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก กับ ปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป อีกทั้ง เมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีการเติม อีพอกซี และ ไม่เติม พบว่า ค่าทดสอบที่ได้ ก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ในเบื้องต้นนี้ว่า การผสมกันระหว่างพอลิคาร์บอนเนต และ เส้นใยคาร์บอน 5% โดยมี อีพอกซีพอลิเมอร์ ทำหน้าเป็นสารช่วยให้เข้ากันได้ดีขึ้น เติมลงไปปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม จะให้คุณสมบัติของเชิงกลเชิงความร้อน และ คุณสมบัติเชิงกล ดีที่สุด

จากผลการทดสอบ ผสมพอลิคาร์บอนเนต เสริมแรงด้วยเส้นใย 3 ชนิด คือ เส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน โดยมีการเติมระบบอีพอกซีลงไป 1% โดยใช้เครื่องบดผสมชนิดแกนคู่ พบว่า โดยศึกษาปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป จาก 5% 10% และ 15% พบว่า ปริมาณเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน ที่เหมาะสม ให้คุณสมบัติ โดยรวมของพอลิเมอร์ผสมเสริมแรง ดีขึ้น คือ 15% 10% และ 5% ตามลำดับ โดยที่การเติมระบบอีพอกซีลงไป จำทำให้ค่าอุณหภูมิการบิดงอ ลดลงเล็กน้อย แต่ ในทางตรงกันข้าม ก็ ทำให้ความแข็งแรงเหนียว และ ความแข็งแรงต่อแรงดึงยึด ดีมากกว่า ระบบที่ไม่มีการเติม ซึ่งแม้จะไม่มากอย่างชัดเจนก็ตาม

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอนเนต เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน

คุณสมบัติทดสอบ	องค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม(โดยน้ำหนัก)					
	PC:CF			PC:CF:ES		
	95:5	90:10	85:15	95:5:1	90:10:1	85:15:1
ค่าอุณหภูมิการบิดงอ(°C)	135±1.0	136±1.0	137±0.6	136±0.6	131±0.6	132±0.6
ความแข็งแรงตกกระแทก(kJ/m ²)	71.6±4.4	34.9±2.7	16.5±1.1	62.2±2.1	7.9±0.5	6.2±0.7
ความแข็งแรงต่อแรงกดคด(MPa)	112.9±10.4	46.8±3.5	48.2±3.1	125.0±3.9	30.2±4.2	25.3±5.6
ความเครียดสูงสุด(MPa)	49±2	23±3	36±3	60±7	50±10	32±3
ความเค้น ณ จุดคราก(%)	5±0	3±0	4±1	4±0	4±0	3±0
โมดูลัสของยัง(MPa)	1050±25	1048±28	1107±59	1087±35	1060±55	1164±48

หมายเหตุ: CF = เส้นใยคาร์บอน(Carbon Fiber) และ ES = ระบบอีพอกซี(Epoxy System)

3.5 การเปรียบเทียบเครื่องมือผสม

จากผลการทดสอบที่ได้ในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าการปริมาณเส้นใยแก้ว เส้นใยเคพลา และเส้นใยคาร์บอน ที่ใช้เสริมแรงพอลิคาร์บอนเนต ได้ดี คือ 15% 10% และ 5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงทำการศึกษเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องผสม ของการผสมระหว่าง พอลิคาร์บอนเนต และเส้นใย ในสัดส่วนการผสมข้างต้นที่กล่าวมา โดยศึกษาใน 2 ระบบการผสมคือระบบที่มีการเติม และไม่ได้เติมสารอีพอกซีลงไป โดยศึกษาวิธีผสมโดยเครื่องผสม 4 วิธีดังที่กล่าวมาแล้ว คือ วิธีที่ 1 ใช้เครื่องผสมแบบแกนคู่ วิธีที่ 2 ใช้เครื่องผสมแบบภายใน วิธีที่ 3 เตรียมเส้นใยความเข้มข้นสูง และ เจือจางลงในเครื่องผสมแกนเดี่ยว และวิธีที่ 4 เป็นการใส่เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยวตามลำดับ โดยวัดประสิทธิภาพ และ ความสามารถในการผสม โดยดูจากค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้ ของตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงที่เตรียมได้ ผลการทดลองใช้วิธีการผสมสำหรับเส้นใยแต่ละชนิดที่ แสดงสรุปในตารางที่ 4.8(a) ถึง ตารางที่ 4.10(a) สำหรับระบบที่ไม่ได้เติมสารช่วยการผสมอีพอกซี และ 3.8(b) ถึง 3.9(b) สำหรับระบบที่มีการเติม 1% สารช่วยการผสมอีพอกซีตามลำดับ

จากตารางที่ 3.8(a) เป็นตารางแสดงสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตผสม และ เสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้ว ที่วิธีการผสมแตกต่างกัน 4 วิธีการผสม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ที่เตรียมได้จากระบบการบดผสม ที่ไม่ได้เติม สารอีพอกซีลงไปด้วย จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าค่าคุณสมบัติการบิดงอ หรือ HDT ของชิ้นทดสอบมีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยที่ค่าทดสอบที่ได้จากชิ้นตัวอย่างที่ผสมโดยไม่ได้เติมอีพอกซีลงไปด้วย พบว่าพอลิเมอร์ผสมเตรียมจากเครื่องบดผสมแบบแกนคู่ จะให้ค่า HDT มากที่สุดที่ 138°C ส่วนชิ้นทดสอบจากเครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว ให้ค่าน้อยที่สุด คือ 136°C ซึ่งความแตกต่างของค่า HDT อันเนื่องมาจากวิธีการบดผสมมีค่าน้อย อาจจะเนื่องมาจาก ค่าน้ำหนัก โมเลกุล ที่ลดลงของพอลิเมอร์ เนื่องจากแรงเฉือนของเครื่องบดผสม มีผลต่อค่า HDT ของพอลิคาร์บอเนต อย่างไม่ชัดเจน

ค่าการต้านทานแรงกระแทก และ แรงด้านการค้ำองซึ่งเป็งคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงเหนียว ของวัสดุ จากการทดลองพบว่า แรงด้านการค้ำองมีค่ามากที่สุด ที่ 108 MPa เมื่อใช้เครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว และ มีค่าน้อยที่สุดที่ 102 MPa เมื่อบดผสมผ่านเครื่องบดผสมแบบภายใน แต่ผลการทดสอบแรงด้านการดกกระแทก ค่าสูงสุดอยู่ที่ 71 MPa เมื่อใช้เครื่องบดผสมแบบภายใน และ ค่าต่ำสุดที่ 63 MPa เมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมความเข้มข้นเส้นใยสูงในเครื่องบดผสมแบบภายใน แล้วนำมาเจือจางลงทำให้ได้สัดส่วนปริมาณเส้นใยตามต้องการในเครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว ส่วนค่าความเค้นสูงสุด ความเครียด ณ จุดคราก และ ค่าโมดูลัสของยัง จากการทดสอบแรงดึง โดยภาพรวมจะเห็นว่าจะมีค่าสูงสุด สำหรับเครื่องบดผสมแบบแกนคู่ ส่วนค่าต่ำสุดจะได้มาจากการทดสอบตัวอย่างที่เตรียมจากเครื่องบดผสมแบบภายใน

ภายใต้ค่าความคาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากการทดลอง และ เทคนิค ที่มี และ ยอมรับได้ อาจจะกล่าวได้ว่า เครื่องบดผสมแบบแกนคู่ซึ่งสามารถผสมส่วนผสมของการผสมเข้ากันได้ดี และมีค่าแรงเฉือนขณะบดผสมต่ำ ส่งผลให้การลดลงของความยาวโซ่พอลิเมอร์มีไม่มากนัก จะทำให้คุณสมบัติของ พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีคุณสมบัติที่ดีกว่า วิธีการบดผสมที่มีผลต่อความสามารถในการผสมเข้ากันได้ไม่ดีมากนัก และ อีกทั้งวิธีการผสมที่มีค่าแรงเฉือนสูงขณะบดผสมที่ทำให้ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ทำการบดผสม มีค่าลดลง ก็จะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ มีคุณสมบัติที่ด้อยกว่า ดังจะเห็นได้จาก การผสมในเครื่องบดผสมแบบภายในเป็นต้น

สำหรับผลการศึกษาคุณสมบัติของการผสมพอลิคาร์บอเนตผสม เสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้ว และ 1% อีพอกซี ซึ่งสรุปในตาราง 3.8(b) จะพบว่าแนวโน้มของผลการทดสอบ จะแตกต่างกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติม 1% อีพอกซีลงไป อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยภาพรวมจะเห็นว่า วิธีการผสมพอลิเมอร์ในเครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว จะให้คุณสมบัติการทดสอบที่ดีกว่า วิธีการอื่นๆ และ ค่าความแตกต่างของผลการทดสอบ ทั้ง 4 วิธีการผสม จะมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญชัดเจน เหมือนกับระบบที่ไม่มีการเติมสารช่วยการเข้ากันได้อีพอกซี ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่า ระบบของอีพอก

ซึ่งที่เติมลงไป ไปนอกจากไปช่วยให้ของผสมเข้ากันได้ และ เพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยเสริมแรง กับ พอลิเมอร์แล้ว มันยังมีส่วนไปทำให้ค่าความหนืดจากแรงเฉือนลดลงด้วย ผลของการลดลงของความหนืดดังกล่าว ทำให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของความยาวโซ่ค่าลดลง แต่ในขณะที่เดียวกันอย่าลืมว่า อาจจะไปทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโซ่พอลิคาร์บอเนต และ อีพอกซี ขึ้น และ เหนียวนำไปให้โซ่มีค่าลดลงก็ได้ อย่างไรก็ตามผลการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยเสริมแรง กับ พอลิเมอร์ มีค่ามากกว่า ผลของการลดลงของคุณสมบัติการทดสอบ อันเนื่องมาจากการลดลงของความยาวโซ่ ก็จะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เติม 1% อีพอกซีลงไป ดังนั้น ค่าที่ทดสอบได้จากตัวอย่างการผสมจากวิธีการผสม ทั้ง 4 วิธี จึงไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เหมือนระบบที่ไม่ได้เติมอีพอกซีลงไป

แต่เมื่อนำค่าการทดสอบจากระบบที่ไม่ได้เติมอีพอกซี และ เติม 1% อีพอกซีลงไป ของการผสม 15% ใยแก้ว กับ พอลิคาร์บอเนต ที่เตรียมผสมจากวิธีการผสมเดียวกัน พบว่าระบบที่มีการเติมอีพอกซี จะมีคุณสมบัติดีกว่า และมีค่าการทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และ โดยภาพรวม และ ถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น พบว่าค่าวิธีการผสมแบบภายใน เป็นวิธีการผสมที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยมากกว่าวิธีการผสมแบบอื่นๆ ซึ่งเหตุผลเรื่องการลดความหนืดเนื่องจากแรงเฉือน และ ความสามารถในการบดผสมเข้ากันได้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว น่าจะอธิบายผลการศึกษาค่าที่ดีที่สุด

ในเบื้องต้นนี้ อาจจะสรุปได้ว่าการบดผสมพอลิคาร์บอเนต กับ 15% เส้นใยแก้ว นั้น เครื่องบดผสมแบบสองแกน จะเหมาะสำหรับการบดผสมส่วนผสม ที่ไม่ได้เติม 1% สารช่วยผสมเข้ากันได้อีพอกซี แต่ เมื่อเติมสารอีพอกซีลงไปแล้ว เครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยวจะให้ผลการบดผสมที่ดีที่สุด จากวิธีการบดผสมทั้ง 4 วิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

คุณสมบัติทดสอบ	วิธีการบดผสม			
	วิธีที่ 1(TWE)	วิธีที่ 2(IM)	วิธีที่ 3(MB+SSE)	วิธีที่ 4(SSE)
ค่าอุณหภูมิการบดงอ(°C)	136±1	137±1	137±1	136±1
ความแข็งแรงตกกระแตก(kJ/m ²)	66.5±1.3	71.1±2.5	63.3±1.4	65.0±1.5
ความแข็งแรงต่อแรงกดคัด(MPa)	106.2±0.5	102.6±0.7	107.7±0.9	108.4±1.6
ความเครียดสูงสุด(MPa)	64±1	47±4	61±3	55±5
ความเค้น ณ จุดคราก(%)	9±0	5±1	7±1	6±1
โมดูลัสของยัง(MPa)	1240±54	1132±83	1146±91	1229±31

ตารางที่ 3.8(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอเนตเสริมแรง ด้วย 15% เส้นใยแก้ว บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน

คุณสมบัติทดสอบ	วิธีการบดผสม			
	วิธีที่ 1(TWE)	วิธีที่ 2(IM)	วิธีที่ 3(MB+SSE)	วิธีที่ 4(SSE)
ค่าอุณหภูมิการบดงอ(°C)	137±0	136±1	135±1	135±1
ความแข็งแรงตกกระแตก(kJ/m ²)	79.3±1.3	91.5±1.0	88.3±1.6	82.1±1.6
ความแข็งแรงต่อแรงกดคัด(MPa)	110.0±0.3	115.3±1.4	112.4±1.2	121.0±1.2
ความเครียดสูงสุด(MPa)	68±1	73±0	70±0	73±1
ความเค้น ณ จุดคราก(%)	10±0	8±0	9±0	9±0
โมดูลัสของยัง(MPa)	1213±40	1257±28	1239±40	1278±110

ตารางที่ 3.8(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอเนตเสริมแรง ด้วย 15% เส้นใยแก้ว และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.9(a) สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตผสมกับ 10% เส้นใยเคฟลา โดยไม่มีการเติมสารช่วยการผสมเข้ากันได้ลงไป เช่นเดียวกับกับผลการทดสอบที่ผ่านมา ค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสม ที่เตรียมจากวิธีการบดผสมโดยใช้เครื่องบดผสมแบบ 2 แกนจะได้ค่าการทดสอบมากที่สุด อยู่ที่ 135°C ส่วนวิธีการผสมจากเครื่องบดผสมแบบภายใน และ เครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว จะให้ค่าต่ำสุดที่ 133°C แต่เมื่อพิจารณาค่าผลการทดสอบเชิงกล ทั้งค่าแรงต้านการดกกระแทก ค่าความแข็งด้านแรงค้ำงอ และ ค่าทนทานต่อแรงดึงยึด พบว่า ตัวอย่างเตรียมจากวิธีการบดผสมโดยเครื่องรีดผสมแบบสองแกน จะให้ค่าการทดสอบสูงที่สุด ส่วนเครื่องรีดผสมแบบแกนเดี่ยวจะให้ค่าต่ำที่สุด

ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่า การผสมพอลิคาร์บอเนต กับ เส้นใยเคฟลา ซึ่งเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวมากที่สุด นั้น ความสามารถในการผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) และ การลดลงของขนาดเส้นใยระหว่างการบดผสม น่าจะเป็นตัวแปรที่สำคัญเพิ่มขึ้นมา นอกเหนือจากตัวแปรตัวอื่นๆ ที่ได้กล่าวมา ในบรรดาเครื่องจักรบดผสมทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เครื่องบดผสมภายใน เครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ และ เครื่องรีดผสมแบบแกนเดี่ยว จะมีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ลดลงตามลำดับ แต่ เครื่องบดผสมแบบภายในจะมีแรงเฉือน และ ระยะเวลาการเฉือน ระหว่างการผสมมากที่สุด ซึ่งจะทำให้นิวเคลียสเส้นใยเคฟลาที่เติมลงไป สั่นลงมากที่สุดเช่นกัน ดังนั้น เครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ ซึ่งให้ค่าความสามารถในการผสมเข้ากันได้ดี และ รักษาขนาดเส้นใยในพอลิเมอร์ผสมไม่ให้ลดขนาดสั้นลงได้ดีที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณารวมกับตัวแปรอื่นที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการผสมพอลิคาร์บอเนต กับ เส้นใยแก้วแล้ว จึงทำให้คุณสมบัติของผสมที่เตรียมได้มีค่ามากกว่าวิธีการผสมแบบอื่น

แต่เมื่อพิจารณาการผสมที่มีการเติม 1% อีพอกซีลงไปในตารางที่ 3.9(b) พบว่าแนวโน้มค่าผลการทดสอบที่ได้ จะเหมือนกับระบบที่ไม่ได้เติมอีพอกซีลงไป ทุกประการ แต่ เมื่อนำค่าผลการทดสอบที่ได้จากวิธีการบดผสมทั้ง 4 วิธีการ ไปเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติม อีพอกซีลงไป จะพบว่ามีความเปราะเพิ่มขึ้น และ ลดลง อย่างกระจัดกระจาย ไม่เหมือนกับ กรณีของการบดผสมด้วยเส้นใยแก้ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การลดความเหนียวเนื่องจากแรงเฉือน เนื่องจากการเติมอีพอกซีลงไป ไม่ได้มีผลต่อคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย อย่างชัดเจนเหมือนกรณีของเส้นใยแก้ว และ จากการศึกษาต่อไปด้วยเทคนิคการถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป พบว่าการเติมอีพอกซีลงไป ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการยึดติดระหว่างเส้นใยเคฟลา และ พอลิคาร์บอเนต เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองทำให้กล่าวได้ว่า สำหรับการผสมทั้งระบบที่มีการเติมอีพอกซี และ ไม่เติมอีพอกซี พบว่าเครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ มีความเหมาะสมในการผสมพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยเคฟลา มากกว่าเครื่องบดผสมแบบภายใน และ เครื่องรีดผสมแบบแกนเดี่ยว

คุณสมบัติทดสอบ	วิธีการบดผสม			
	วิธีที่ 1(TWE)	วิธีที่ 2(IM)	วิธีที่ 3(MB+SSE)	วิธีที่ 4(SSE)
ค่าอุณหภูมิการบดงอ(°C)	135±0	133±1	134±1	133±1
ความแข็งแรงตกกระแทก(kJ/m ²)	72.3±2.8	71.8±1.5	67.0±1.0	55.5±1.4
ความแข็งแรงต่อแรงกดคัด(MPa)	106.5±2.5	103.7±0.8	97.2±1.8	87.2±8.9
ความเครียดสูงสุด(MPa)	66±1	23±6	32±3	34±5
ความเค้น ณ จุดคราก(%)	8±0	3±1	4±1	4±1
โมดูลัสของยัง(MPa)	1095±39	931±51	1015±27	1009±50

ตารางที่ 3.9(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอเนตเสริมแรง ด้วย 10% เส้นใยเคฟลา บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน

คุณสมบัติทดสอบ	วิธีการบดผสม			
	วิธีที่ 1(TWE)	วิธีที่ 2(IM)	วิธีที่ 3(MB+SSE)	วิธีที่ 4(SSE)
ค่าอุณหภูมิการบดงอ(°C)	134±1	131±1	133±1	132±1
ความแข็งแรงตกกระแทก(kJ/m ²)	69.2±2.0	67.6±1.5	60.3±0.7	51.2±1.0
ความแข็งแรงต่อแรงกดคัด(MPa)	108.1±2.7	102.7±0.4	103.7±1.2	103.3±2.4
ความเครียดสูงสุด(MPa)	65±3	24±1	34±5	55±6
ความเค้น ณ จุดคราก(%)	9±2	2±0	4±1	6±1
โมดูลัสของยัง(MPa)	1016±53	1004±31	1009±57	996±7

ตารางที่ 3.9(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอเนตเสริมแรง ด้วย 10% เส้นใยเคฟลา และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.10(a) สรุปแสดงค่าผลการทดสอบตัวอย่างของพอลิคาร์บอนเนตผสมเสริมแรงด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน โดยที่ไม่เติมสารช่วยการผสมเข้ากันได้ อีพอกซีลงไป จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า ค่า HDT สูงสุด สำหรับตัวอย่างของผสมที่เตรียมจากเครื่องรีดผสมแบบสองแกน และ ค่าต่ำสุด เมื่อใช้เครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยว เช่นเดียวกับกับระบบการผสมกับเส้นใยอื่นๆ ที่ได้กล่าวมา

แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบเชิงกล พบว่า มีแนวโน้มคล้ายกับการเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลา ยกเว้น ค่าความแข็งแรงด้านการดัดงอ ที่การผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบภายในให้ค่าการทดสอบสูงกว่า ตัวอย่างที่บดผสมจากเครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ แต่เมื่อพิจารณาของคุณสมบัติอื่นๆ พบว่าพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงที่เตรียมจากเครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ จะให้ค่าการทดสอบสูงกว่าวิธีการบดผสมวิธีการอื่น โดยเฉพาะค่าแรงต้านแรงดึงยึด จะเห็นว่าค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนมาก ซึ่งอาจจะอธิบายได้ด้วยเหตุผลของการลดขนาดเส้นใยคาร์บอนระหว่างการบดผสม เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีความเปราะมากที่สุดในการบดเส้นใยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นแรงเฉือนและความหนืด เนื่องจากแรงเฉือน ที่เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ เส้นใยป่นละเอียดสั้นลงมาก ระหว่างการบดผสม นอกจากนี้ ความสามารถในการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ของเครื่องบดผสม ก็เป็นตัวแปรสำคัญอีกประการหนึ่งที่สามารถนำมาอธิบาย ผลการทดลองได้ ดังที่ได้ใช้อธิบายมาแล้ว ในกรณีของเส้นใยเคฟลา

สำหรับระบบการผสมที่มีการเติม 1% อีพอกซีลงไป ซึ่งผลการทดสอบได้สรุปไว้ในตาราง 3.10(b) นั้น ผลการทดลองสอดคล้องกับ ระบบที่มีการใช้เส้นใยเคฟลา ทุกประการ โดยที่การบดผสมด้วยเครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ จะให้ผลการบดผสมที่ดี โดยพิจารณาจาก ค่าคุณสมบัติเชิงกล ที่ทดสอบได้มีค่ามากกว่า วิธีการบดผสมแบบอื่นๆ และ เมื่อเปรียบเทียบค่าจากระบบที่ไม่ได้เติม อีพอกซี และ เติม 1% อีพอกซี ลงไป ก็ จะพบว่า ภายในค่าความผิดพลาดที่มีอยู่ ผลการทดลองที่ได้มีทั้งลดลง และ เพิ่มขึ้น โดยไม่มีความสัมพันธ์กับ วิธีการบดผสมอย่างชัดเจน และ ไม่สามารถสรุปให้เห็นได้ชัดเจน

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาทั้งหมดทำให้กล่าวได้ว่า ในการผสมพอลิคาร์บอนเนต กับ 15% เส้นใยแก้ว 10% เส้นใยเคฟลา และ 5% เส้นใยคาร์บอน ตามลำดับ ทั้งระบบการผสมที่ไม่มีการเติมอีพอกซี และ เติม 1% อีพอกซีลงไป พบว่าวิธีการผสมโดยใช้เครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ จะเป็นวิธีการผสมที่ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสม มีค่ามากกว่า วิธีการผสมแบบอื่น ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยเฉพาะการผสมพอลิคาร์บอนเนต กับ เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน ส่วนการเติม 1% อีพอกซีลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของการผสม นั้นพบว่า จะมีผลให้คุณสมบัติดีขึ้นอย่างชัดเจน ในกรณีของการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ส่วนการเสริมแรงด้วยเส้นใยอีก 2 ชนิดนั้น ผลการทดลองไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของคุณสมบัติการทดสอบ อย่างชัดเจน

คุณสมบัติทดสอบ	วิธีการบดผสม			
	วิธีที่ 1(TWE)	วิธีที่ 2(IM)	วิธีที่ 3(MB+SSE)	วิธีที่ 4(SSE)
ค่าอุณหภูมิการบดงอ(°C)	135±1	133±1	134±1	132±1
ความแข็งแรงตกกระแตก(kJ/m ²)	71.6±4.4	70.9±1.0	63.7±2.2	50.7±1.1
ความแข็งแรงต่อแรงกดคัด(MPa)	112.9±10.4	123.5±1.9	95.2±1.5	93.4±2.2
ความเคียวสูงสุด(MPa)	49±8	29±1	21±1	18±1
ความเต็ม ณ จุดคราก(%)	5±0	3±0	2±0	2±0
โมดูลัสของยัง(MPa)	1050±25	1156±40	1040±20	1063±8

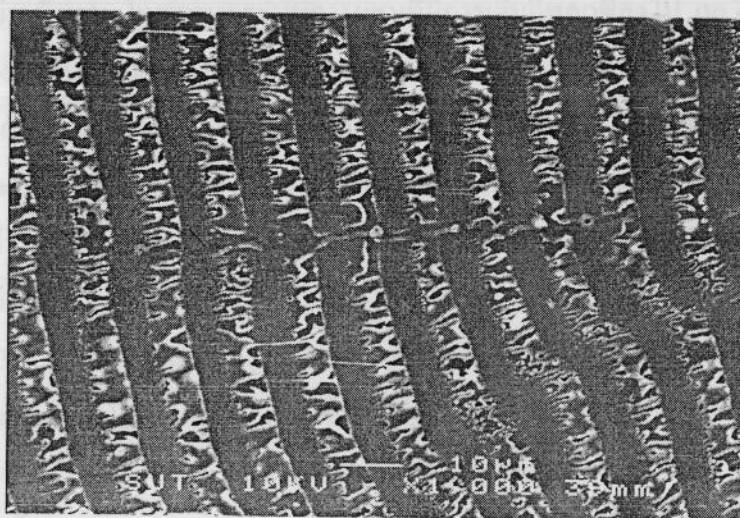
ตารางที่ 3.10(a) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอนเนตเสริมแรง ด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน

คุณสมบัติทดสอบ	วิธีการบดผสม			
	วิธีที่ 1(TWE)	วิธีที่ 2(IM)	วิธีที่ 3(MB+SSE)	วิธีที่ 4(SSE)
ค่าอุณหภูมิการบดงอ(°C)	136±1	129±1	132±1	130±1
ความแข็งแรงตกกระแตก(kJ/m ²)	62.2±2.1	59.7±0.6	63.6±1.2	50.7±0.9
ความแข็งแรงต่อแรงกดคัด(MPa)	125.0±3.9	79.6±1.6	87.7±8.2	81.2±9.6
ความเคียวสูงสุด(MPa)	61±7	39±3	34±5	27±2
ความเต็ม ณ จุดคราก(%)	4±0	3±0	3±0	3±0
โมดูลัสของยัง(MPa)	1087±35	1177±89	1044±51	1024±59

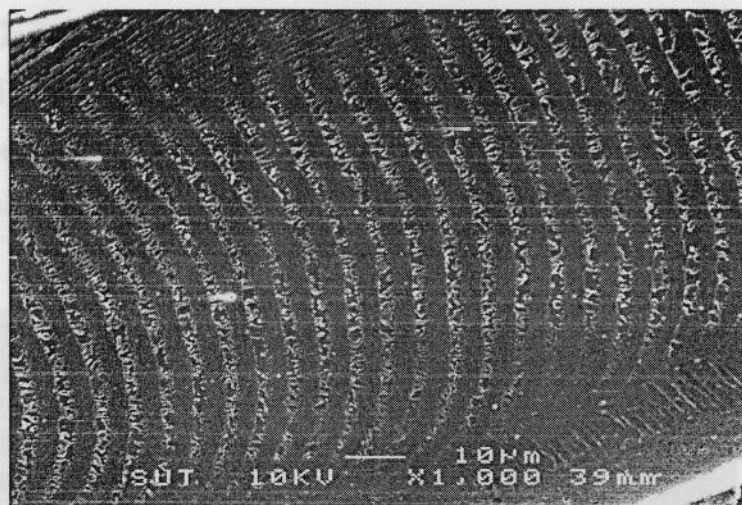
ตารางที่ 3.10(b) คุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ของ พอลิคาร์บอนเนตเสริมแรง ด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน และ 1% อีพอกซี บดผสมด้วยวิธีแตกต่างกัน

3.6 การตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา

ในการศึกษาภาพขยายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscopy, SEM) ของพื้นที่ผิวรอยหักของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถึง 3.6 ซึ่งใช้กำลังขยายเท่ากับ 1000 เท่า จากภาพที่ 3.3 ซึ่งเป็นภาพ SEM ของพื้นที่ผิวรอยหักพอลิคาร์บอเนต และ พอลิคาร์บอเนตผสมกับ สารช่วยผสมเข้ากันได้อีพอกซี ตามลำดับ ซึ่งจากภาพสัณฐานวิทยาจะเห็นได้ว่า พอลิคาร์บอเนต ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน(Miscible Blend) กับ สารอีพอกซี นอกจากนี้จากภาพจะเห็นว่ารอยแตกของพอลิคาร์บอเนต เป็นรอยขนาดใหญ่ กว่า รอยรอยแตกของพอลิเมอร์ผสม อย่างเห็นได้ชัดเจน จากรอยรอยดังกล่าวทำให้สามารถกล่าวได้ว่า กระบวนแตกร้าวของพอลิคาร์บอเนต มีอัตราเร็วของการขยายตัวการแตกร้าว(Crack Propagation) เร็วกว่า พอลิเมอร์ที่ผสมสารอีพอกซีลงไป จากเหตุผลดังกล่าวจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเหนียวสูงกว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอีพอกซีลงไป ซึ่งคำอธิบายดังกล่าว จะสอดคล้องกับผลการทดสอบเชิงกล ทั้งค่าแรงต้านแรงดกกระแทก และ แรงด้านการดึงงอ ที่ได้นำเสนอมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ผลจากภาพ SEM และ ผลจากการทดสอบสมรรถนะ ของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม ทำให้สรุปได้ว่าการเติมอีพอกซีลงไปในพอลิคาร์บอเนต จะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีความแข็งแรงเหนียวมากขึ้น โดยที่อีพอกซีที่เป็นโซ่กิ่งที่เติมลงไป จะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเหนียว(Fracture Toughener) ของพอลิเมอร์ด้วย



(a)



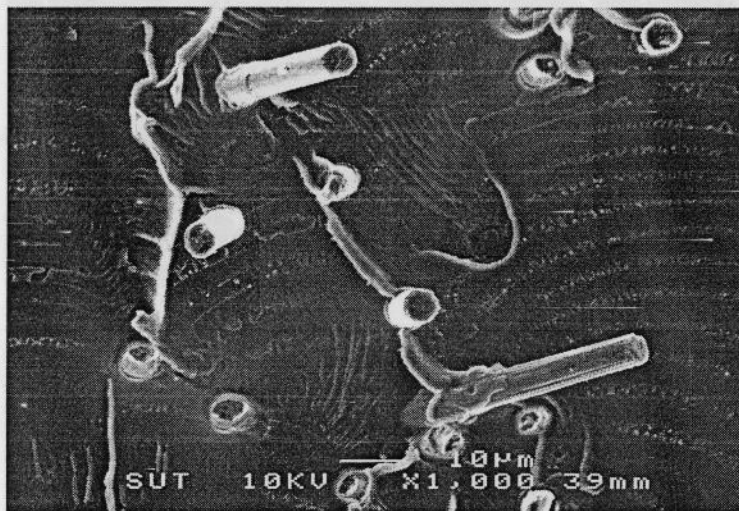
(b)

รูปที่ 3.3 ภาพสัณฐานวิทยาของรอยหักของ (a) พอลิคาร์บอนเนต และ (b) พอลิคาร์บอนเนตผสมอีพอกซี

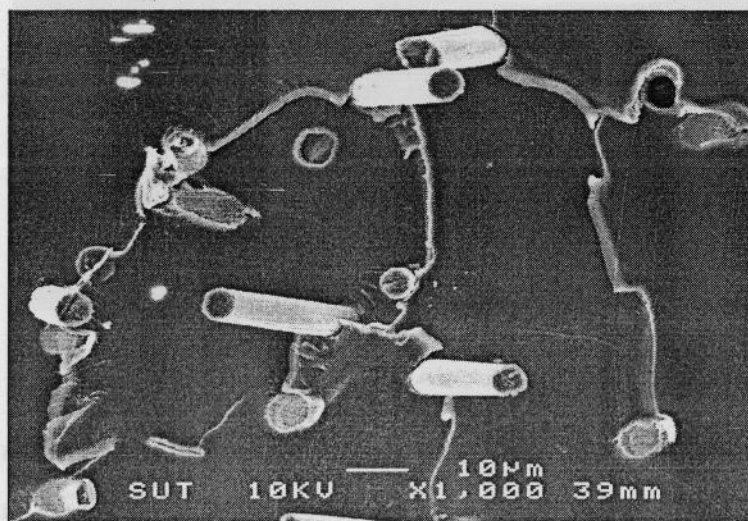
รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่าย SEM รอยหักของพอลิคาร์บอนเนต ที่ผสมเส้นใยเสริมแรงคาร์บอนลง
ไป 5% สำหรับระบบการผสมที่มีอีพอกซี และ ไม่มีอีพอกซี เป็นสารช่วยการผสมเข้ากันได้ ซึ่งบด
ผสมด้วยเครื่องรีดบดผสมแบบแบบแกนคู่ จากภาพทั้ง 2 จากระบบการบดผสมทั้ง 2 ระบบ จะเห็นว่า
มีร่องรอย กลไกการหักแบบเส้นใยดึงหลุด(Fibre Pull-out) และ การขาดของเส้นใย(Fibre
Debonding) อย่างชัดเจน โดยเฉพาะระบบการผสมที่มีการเติมอีพอกซีลงไป กลไกการขาดของการ
แตกหักของชิ้นงานอันเนื่องมาจากการดึงหลุดของเส้นใย แสดงให้เห็นถึง ความแข็งแรงการยึดติด
ระหว่างเส้นใย กับ เนื้อของพอลิเมอร์ มีค่าน้อยกว่า ความแข็งแรงของไฟเบอร์ นอกจากนี้ จากภาพเรา
ยังสามารถสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างเส้นใย กับ เนื้อของพอลิเมอร์ อีกด้วย ซึ่งก็เป็นการยืนยันถึง
แรงยึดติดระหว่างเส้นใย กับ พอลิคาร์บอนเนต ที่ไม่ได้ ทำให้ ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง เมื่อ
เติมสารอีพอกซีลงไป

รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่าย SEM รอยหักของชิ้นงานพอลิคาร์บอนเนตผสม เสริมแรงด้วยเส้น
ใยเคฟลา ทั้งระบบที่ไม่ได้เติม และ เติม อีพอกซีผสมลงไป ตามลำดับ จากภาพเราจะสังเกตเห็น
ร่องรอยการขาดของเส้นใยเคฟลา ซึ่งอาจจะขาดเนื่องมาจากการบดผสม หรือ ขาดระหว่าง
การทดสอบแรงต้านแรงดกกระแทก ก็ได้ ถ้าเป็นเหตุผลเนื่องจากกรณีนี้ อาจจะทำให้เชื่อได้ว่า
การเติมเส้นใยเคฟลาลงไป จะไปทำให้ความแข็งแรงเหนียวของพอลิคาร์บอนเนตผสม เสริมแรงด้วยเส้น
ใยเคฟลา มีคุณสมบัติดีขึ้น เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างเส้นใย กับ เนื้อพอลิเมอร์ ดีมากขึ้น แต่จากการ
พิจารณาสังเกตอย่างละเอียด พบว่า มีร่องรอยแยกระหว่างเส้นใย กับ เนื้อพอลิเมอร์ ถึงแม้จะเติมสาร
ช่วยผสมเข้ากันได้ อีพอกซีลงไปก็ตาม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การผสมระหว่างเส้นใยเคฟลา และ

พอลิคาร์บอเนต มีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ไม่ดี รอยร่องระหว่างเส้นใย กับ พอลิเมอร์นี้ จะมักทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศขนาดเล็ก และ ทำให้การหลุดของเส้นใย ขณะรับแรงเป็นไปได้ง่าย ส่งผลถึงความแข็งแรงเหนียวของ พอลิเมอร์ผสม มีค่าต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับ ผลทดสอบเชิงกลที่ ทดสอบค่าได้ ในหัวข้อที่ผ่านมา

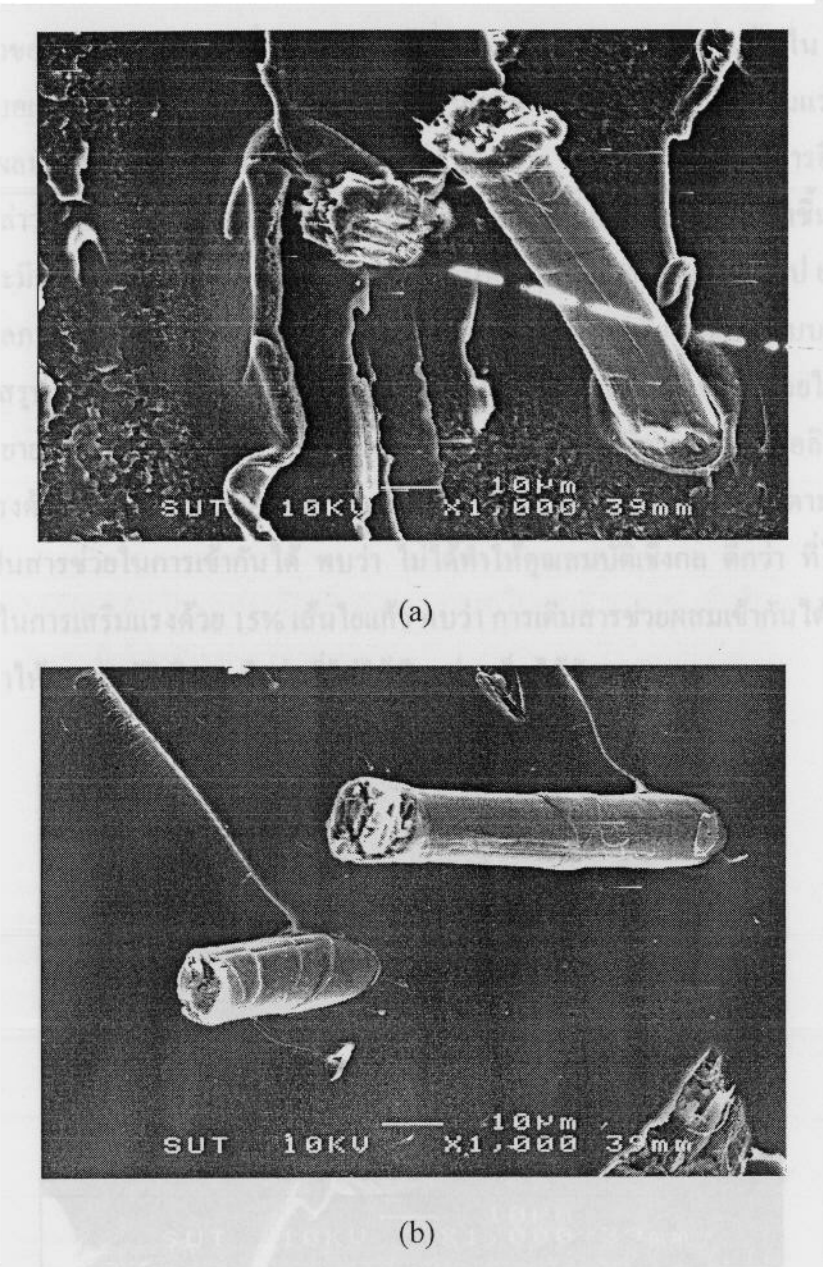


(a)



(b)

รูปที่ 3.4 ภาพถ่าย SEM รอยหักของพอลิคาร์บอเนตผสม เสริมแรงด้วย 5% เส้นใยคาร์บอน ที่ (a) ไม่เติม และ (b) เติม สารอีพอกซี กำลังขยาย 1000 เท่า

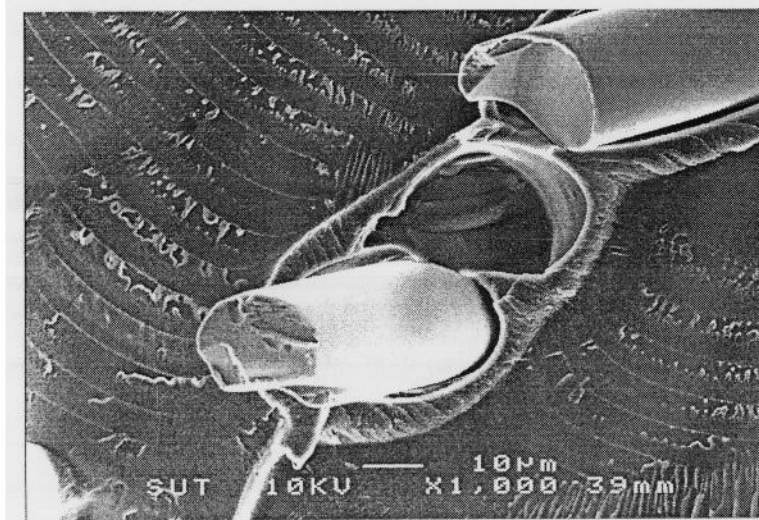


รูปที่ 3.5 ภาพถ่าย SEM รอยหักของพอลิคาร์บอนเนตผสม เสริมแรงด้วย 10% เส้นใยเคฟลา ที่ (a) ไม่ได้เติม และ (b) เติม สารอีพอกซี ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

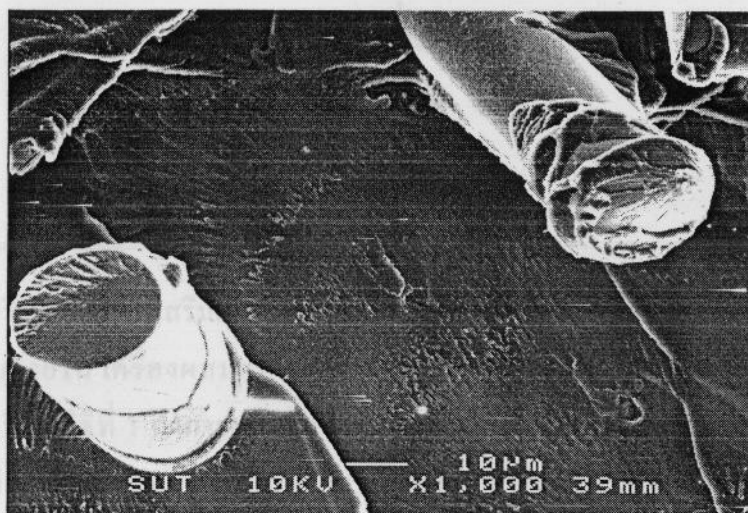
ภาพถ่ายรอยแตก ของชิ้นงานพอลิคาร์บอนเนตผสม เสริมแรงด้วยเส้นแก้ว 15% ที่ไม่ได้เติม และ เติม 1% อีพอกซีลงไป แสดงในรูปที่ 3.6 ตามลำดับ จากภาพถ่ายจากชิ้นงานที่ไม่ได้เติมอีพอกซีลงไป จะเห็นช่องว่างระหว่างเส้นใย กับ เนื้อพอลิเมอร์อย่างชัดเจน แต่ เห็นร่องรอยการหลุดของเส้นใยแก้วเสริมแรง จากเนื้อของพอลิเมอร์ด้วย แต่เมื่อเติมสารอีพอกซีลงไปในส่วนผสม จะเห็นว่าช่องว่างได้หายไป และ เส้นใย กับ เนื้อพอลิเมอร์ มีผิวสัมผัสยึดติด กันได้ดี และ ไม่เห็นรอยการหลุด

ของเส้นใย ระหว่างการหักเนื่องจากแรงดกกระแทก อีกทั้ง เมื่อสังเกตที่ปลายของเส้นใย จะแสดงเห็นรอยการขาดตัวของเส้นใย จากภาพที่ถ่ายได้ ทำให้เชื่อว่า การเติมสารอีพอกซีลงไป ในระหว่างผสมพอลิคาร์บอนเนต กับ เส้นใยแก้ว จะช่วยให้เกิดการยึดติดกัน ระหว่างเส้นใยเสริมแรง และ พอลิเมอร์ดีขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเหนียวของวัสดุ มีค่ามากกว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสารอีพอกซีลงไป ซึ่งเหตุผลดังกล่าวสนับสนุนโดยค่าการทดสอบ ความแข็งแรงเชิงกลที่ทดสอบได้ ซึ่งชิ้นงานที่เติม อีพอกซีลงไป จะมีค่า ความแข็งแรงเชิงกล มากกว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสารอีพอกซีลงไป อย่างชัดเจน

จากผลภาพถ่ายสัณฐานวิทยา ของชิ้นงานที่เตรียมขึ้นมา จากเครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ ทำให้สามารถกล่าวสรุปได้ว่า สารอีพอกซี ที่เติมผสมลงไป ในพอลิคาร์บอนเนต จะไปช่วยให้พอลิเมอร์มีอัตราเร็วการขยายรอยแตกหักยากขึ้น ส่งผลถึงคุณสมบัติความแข็งแรงเหนียวของวัสดุพอลิเมอร์ ที่ดีขึ้น ในการเสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรงคาร์บอน และ เคฟลา ในปริมาณ 5% และ 10% ตามลำดับ โดยมีสารอีพอกซีเป็นสารช่วยในการเข้ากันได้ พบว่า ไม่ได้ทำให้คุณสมบัติเชิงกล ดีกว่า ที่ไม่ได้เติมสารดังกล่าว ส่วนในการเสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้ว พบว่า การเติมสารช่วยผสมเข้ากันได้ชนิดอีพอกซีเพียง 1% จะทำให้คุณสมบัติเชิงกล ดีกว่า ที่ไม่ได้เติมอย่างเห็นได้ชัดเจน



(a)



(b)

รูปที่ 3.6 ภาพถ่าย SEM รอยหักของพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้ว ที่ (a) ไม่เติม และ (b) เติม สารอีพอกซี ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

บทที่ 5

บทสรุป

จากการวิจัยศึกษาการเสริมแรงพอลิคาร์บอเนตด้วยเส้นใยสั้นโดยใช้เครื่องมือผสม 3 ชนิดคือ เครื่องผสมแบบภายใน เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยว และ เครื่องผสมแบบแกนคู่ โดยทำการผสมแตกต่างกัน 4 วิธีคือ วิธีที่ 1 ทำการผสมโดยเครื่องผสมแกนคู่ วิธีที่ 2 ทำการผสมโดยเครื่องผสมภายใน วิธีที่ 3 ทำการผสมโดยการเตรียมพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยปริมาณเข้มข้นสูงโดยเครื่องผสมแบบภายใน แล้ว นำไปเจือจางให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการ โดยเครื่องผสมแบบแกนเดี่ยว และวิธีสุดท้ายทำการผสมโดยเครื่องผสมแบบแกนเดี่ยว ใช้เส้นใยที่นำมาผสมมี 3 ชนิดคือ เส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน พบว่าเครื่องผสมแบบภายในซึ่งให้แรงเฉือนสูงที่สุด ทำให้ความยาวใยของพอลิคาร์บอเนตลดลงมากที่สุด ส่วนเครื่องรีดผสมแบบแกนเดี่ยวซึ่งมีแรงเฉือนต่ำสุด การลดลงของความยาวใยจะน้อยที่สุด การเติมอีพอกซีลงไประหว่างการบดผสม ช่วยลดแรงเฉือนลง แต่มีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอีพอกซี และ ใยพอลิเมอร์

ผลเนื่องจากแรงเฉือนยังส่งผลทำให้การลดขนาดความยาวของเส้นใยสั้นลง ตามขนาดแรงเฉือนที่ได้รับ และจากการศึกษายังพบว่า ขนาดความยาวเส้นใยที่เหลือสุด ท้าย ไม่ได้ขึ้นกับขนาดของเส้นใยเริ่มต้นที่เติมลงไป และ เช่นเดียวกัน อีพอกซี ยังช่วยทำให้ขนาดเส้นใยลดขนาดสั้นน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการเติมอีพอกซีลงไป

ระบบอีพอกซีซึ่งเติมลงไปเพื่อช่วยให้การผสมเข้ากันได้ดี จะทำให้ค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมลดลงเล็กน้อย แต่จะทำให้คุณสมบัติเชิงกล ในด้านความแข็งแรงเหนียว ดีขึ้น กว่าระบบที่ไม่ได้เติมอีพอกซี สำหรับระบบพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน ของทั้ง 2 ระบบการผสม พบว่า ปริมาณเส้นใยที่สามารถผสมเสริมแรงกับพอลิเมอร์ คือ 15% 10% และ 5% ตามลำดับ และ การเติมอีพอกซีลงไป จะทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ การเพิ่มขึ้นไม่ชัดเจน หรือ น้อยมาก สำหรับการเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลา และ เส้นใยคาร์บอน

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบดผสมของเครื่องมือผสมที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ตัวแปรคุณสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่า ระบบที่ไม่มีการเติมอีพอกซีลงไป เครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ จะทำให้ประสิทธิภาพการบดผสมดี กว่า เครื่องบดผสมชนิดอื่น แต่ เมื่อเติม อีพอกซีลงไป จะพบว่า ประสิทธิภาพของเครื่องมือผสม จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเส้นใยเสริมแรง ที่ใช้ใน

การบดผสม ไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน แต่ เครื่องรีดผสมแบบแกนคู่ ก็ยังคงเป็นเครื่องจักรทางเลือกที่ดี ชนิดหนึ่งเหมือนกัน

และจากผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) เพื่อสนับสนุนผลการทดสอบเชิงกล พบว่าอีพอกซีที่เติมลงไปสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับ พอลิคาร์บอเนตได้ สำหรับการเสริมแรงด้วย 5% และ 10% เส้นใยคาร์บอน และ เกล็ด ตามลำดับนั้น การเติมสารอีพอกซีลงไป ไม่ได้ช่วยให้การยึดติดกัน ระหว่างเส้นใย และ เนื้อพอลิเมอร์ดีขึ้น ส่งผลถึงคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่ได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนระบบการเสริมแรงด้วย 15% เส้นใยแก้วนั้นพบว่า อีพอกซีช่วยทำให้เกิดการยึดติด ระหว่างเส้นใยแก้ว และ เนื้อพอลิคาร์บอเนตมากขึ้น ส่งผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ ระบบที่ไม่ได้เติมอีพอกซีลงไป

บรรณานุกรม

- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2546). การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. ครั้งที่ 6. พิมพ์ที่ บริษัท ชรรณสาร จำกัด. กรุงเทพฯ.
- Anton, J. J. S., Ribelles, J. L. G., Pradas, M. M., and Izquierdo, G. A. (1999). Anhydride and diamine epoxy-kevlar composites: thermal and dynamic mechanical properties. **Polym. Adv. Technol.** 10: 615-619.
- Boey, F. Y. C., Yap, B. H., and Chia, L. (1999). Microwave curing of epoxy-amine system-effect of curing agent on the rate enhancement. **Polym. Test.** 18: 93-109.
- Brandrup, J., Immergut, E. H., and Grulke, E. A. (1999). **Polymer handbook.** 4th edition. New York: Wiley-Interscience.
- Carfagna, C., Acierno, D., Palma, V. D., Amerdola, E., Giamberini, M. (2000). Composites based on carbon fibers and liquid crystalline epoxy resin, 1 Monomer synthesis and matrix curing. **Macromol. Chem. Phys.** 201: 2631-2638.
- Carneiro, O. S., Covas, J. A., Bernardo, C. A., Caldeira, G., Van Hattum, F. W. J., Ting, J., Alig, R. L., and Lake, M. L. (1998). Production and assessment of polycarbonate composites reinforced with vapour-grown carbon fibers. **Compos. Sci. and Technol.** 58: 401-407.
- Chang, S., Hwang, J., and Doong, J. (2000). Optimization of the injection molding process of short glass fiber reinforced polycarbonate composites using grey relational analysis. **J. Mater. Proc. Technol.** 97: 186-193.

- Chase, W., and Bown, F. (2000). **General statistics**. 4th edition. New York: John Wiley&Sons, Inc.
- Choi, J., Lim, S., Kim, J., and Choe, C. (1997). Studies of an epoxy-compatibilized poly(phenylene sulfide)/polycarbonate blend. **Polymer**. 38: 4401-4406.
- Conover, W. J. (1999). **Practical nonparametric statistics**. 3rd edition. New York: John Wiley&Sons, Inc. 114-119.
- Don, T., and Bell, J. P. (1998). Fourier transform infrared analysis of polycarbonate / epoxy mixtures cured with an aromatic amine. **J. Appl. Polymer Sci.** 69: 2395-2407.
- Don, T., Yeh, C., and Bell, J. P. (1999). Structures and properties of polycarbonate-modified epoxies from two different blending process. **J. Appl. Polymer Sci.** 74: 2510-2521.
- Dowdy, S. M., Wearden, S., and Chilko, D. (2004). **Statistics for research**. 3rd edition. New Jersey. John Wiley&Sons, Inc.
- Feldman, D. and Barbalata, A. (1996). **Synthetic polymers technology, properties, applications**. London: Chapman&Hall.
- Freund, R. J., and Wilson, W. J. (1993). **Statistical methods**. Revised edition. New York. Academic Press.
- Green, S. B., Salkind, N. J., and Akey, T. M. (2000). **Using SPSS for windows analyzing and understanding data**. 2nd edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Hagenaars, A. C., Goddrie, W. -J., and Bailly, Ch. (2002). Thermally induced redistribution and degradation of bisphenol-A polycarbonate fractions in open and closed system. **Polymer**. 43: 5043-5049.

- Ho, K., and Jeng, M. (1997). Tribological characteristics of short glass fiber reinforced polycarbonate composites. **Wear**. 206: 60-68.
- Huang, Y., and Young, R. J. (1996). Interfacial micromechanics in thermoplastic and thermosetting matrix carbon fiber composites. **Comp. Part A**. 27A: 973-980.
- Kayano, Y., Keskkula, H., and Paul, D. R. (1996). Effect of Polycarbonate molecular weight and processing conditions on mechanical behavior of blends with a core-shell impact modifier. **Polymer**. 37: 4505-4518.
- Kaynak, C., Arıkan, A., and Tincer, T. (2003). Flexibility improvement of short glass fiber reinforced epoxy by using a liquid elastomer. **Polymer**. 44: 2433-2439.
- Lee, J. K., and Han, C. D. (2000). Evolution of polymer blend morphology during compounding in a twin-screw extruder. **Polymer**. 41: 1799-1815.
- Li, M., Ma, C., Lin, M., and Chang, F. (1997). Chemical reactions occurring during the preparation of polycarbonate-epoxy blends. **Polymer**. 38: 4903-4913.
- Rong, M., and Zeng, H. (1996). Polycarbonate/epoxy semi-interpenetrating polymer network: 1. Preparation, interaction and curing behaviour. **Polymer**. 37: 2525-2531.
- Rong, M., and Zeng, H. (1997). Polycarbonate/epoxy semi-interpenetrating polymer network: 2. Phase separation and morphology. **Polymer**. 38: 269-277.
- Shannon, D. M., and Davenport, M. A. (2001). **Using SPSS® to solve statistical problems A self-instruction guide**. New Jersey: Merrill Prentice Hall.
- Sprent, P., and Smeeton, N. C. (2001). **Applied nonparametric statistical methods**. 3rd edition. Boca Raton: Chapman&Hall/CRC. 197-210.
- Sweet, A. S. (1999). **Data analysis with SPSS**. Boston: Allyn&Bacon.

- Tanaka, M., Moritaka, Y., Akahoshi, Y., Nakamura, R., Yamori, A., and Sasaki, S. (2001). Development of a lightweight space debris shield using high strength fibers. **Int. J. Impact Engng.** 26: 761-772.
- Teraoka, I. (2002). **Polymer solutions and introduction to physical properties.** New York: John Wiley&Sons publication. 213-216.
- Thomson, J. L., and Vlug, M. A. (1996). Influence of fiber length and concentration on the properties of glass fiber-reinforced polypropylene: 1. Tensile and flexural modulus. **Comp. Part A.** 27A: 477-484.
- Tjong, S. C., and Meng, Y. Z. (2000). Effect of reactive compatibilizers on the mechanical properties of polycarbonate/poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) blends. **Eu. Polym. J.** 36: 123-129.
- Weitzsacker, C. L., Xie, M., and Drzal, L. T. (1997). Using XPS to investigate fiber/matrix chemical interactions in carbon-fiber-reinforced composites. **Surf. Interface Anal.** 25: 53-63.
- White, J. L., Coran, A. Y., and Moet, A. (2001). **Polymer mixing technology and engineering.** Munich: Hanser Publishers.
- Woo, E. M., and Mao, k. L. (1996). Interlaminar morphology effects on fracture resistance of amorphous polymer-modified epoxy-carbon fiber composites. **Comp. Part A.** 27A: 625-631.

ประวัติผู้วิจัย

UTAI MEEKUM

School of Polymer Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology, Nakornratchasima, 30000
 Tel. (044)- 224430-1, 224312, 225348(home) and 091065348(mobile)
 Fax. (044)- 224220, 224431 , 224165
 E-mail: umsut@ccs.sut.ac.th

BIODATA:

Date of Birth	March 24, 1967
Age	36
Place of Birth	Phare
Marriage Status	Single
Personal Profile	180 cm, 67 kg

EDUCATION:

B.Sc (Hon.), **Chemistry**, 1990
 Department of Chemistry, Chaingmai University, Chaingmai,
Thailand(Under scholarship of *The Development and*
Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST))
 PhD., **Chemistry and Chemical Technology**, 1994
 Dept. of Chemical Engineering, University of Bradford,
UK(Under scholarship of *The Development and Promotion of*
Science and Technology Talents Project (DPST))

EXPERIENCES:

2000	Research Fellowship, Department of Plastic Engineering, University of Leoben, Austria (<i>Granted by Thai-Austria</i> <i>Scholarship</i>)
1999 – present	Head of School of Polymer Engineering(<i>Acting</i>), Suranaree University of Technology
1999 – present	Company Consultant at Cobra International Co. Ltd.
1996 - present	Assistant Professor in Polymer Engineering, School of Polymer Engineering, Suranaree University of Technology
1994 – 1996	Lecturer in Polymer Engineering, School of Polymer Engineering, Suranaree University of Technology
1999	Training of the Trainer Program in The Competency-based Economies through Formation of Enterprise (CEFE) for Small and Medium Enterprises(SMEs)
1996	Visiting Scientist, Department of Chemical Technology,

- Technical University of Graz, **Austria**(*Granted by Thai-Austria Scholarship*)
- 1995 • Study the Conductivity of the Ozone Treated Carbon Fiber
Visiting Researcher, School of Polymer Engineering, Lulea
University, **Sweden**(*Granted by The Swedish Institute*)
- 1990 • Researching on Fracture Toughening of Epoxy Resin by
Using Thermoplastics as Toughener
Shift Engineer at Thai Carbon Black Public Company(TCB),
Aung-
Tong, Thailand

Teaching Courses:

Undergraduate Courses:

- Engineering Materials
- Polymer Science
- Physical Properties of Polymer
- Polymer Testing Laboratory
- Polymer Laboratory
- Polymer Processing Lab. I
- Polymer Processing Lab. II
- Polymeric Materials
- Polymer Chemistry
- Polymerisation Processes and Polymer Manufacture
- Polymer Blends and Composites
- Introduction to Polymer Rheology and Processes
- Polymer Characterization
- Textile Technology
- Plastic Waste Management
- Rubber Technology
- Industrial Pollution Control and Waste Treatment
- Electrical Engineering Materials
- Instrumentation and Control System
- Instrumentation and Control System Lab.
- Fiber Reinforced Materials
- Die Design
- Safety Engineering

Graduate Courses:

- Polymer Engineering
- Advanced Polymer Processing
- Advanced Polymer Composites
- Polymer Mixing and Compounding
- Materials Selection and Design

Research Topics Involved

- Preliminary Study to Construct Racing Bicycle from Composite Polymers (*Financial support from National Metal and Materials Technology Center, MTEC*)
- Study of Conformation of Cyclic Carbonates Using X-ray Diffraction(*Financial support from Thai Research Council*)
- Environmental Aspect of Polystyrene Degradation(*Master Thesis for Environmental Engineering Graduate Program*)
- The Use of Polymeric Coagulant in Water Treatment(*Master Thesis for Environmental Engineering Graduate Program*)
- Feasibility Study of Using Starch as Filler for Producing the Biodegradable Injection Molded Products(*Financial support from Thai Research Council, co-researcher*)
- Preliminary Study of Using Carbonized Rice Hull as Engineering Plastics Filler(*Financial support from Thai Research Council, co-researcher*)
- Compounding of Engineering Polymer(*Financial support from Thai Research Council*)
- Resin Formulation For Windsurf and Surfboard Manufacturing(*Financial Support from Thailand Research Fund(TRF) and Cobra International Co. Ltd.*)
- Optimal Design for Manufacturing Fiber Reinforced Propeller Fans Used in Cooling Tower(*Financial Support from Thailand Research Fund(TRF) and BKK Cooling Co. Ltd.*)
- Manufacturing Dough Molding Compound(DMC) From Fiber Reinforcement Waste in Composite Industry(*Financial Support from Thailand Research Fund(TRF) under IPUS Project*)
- Surface Treatment of Fiber Glass to Improve Mechanical Properties and Weight Reduction for Windsurf and Surfboard Manufacturing(*Financial Support from Thailand Research Fund(TRF) under IPUS Project*)

PUBLICATIONS AND AWARDS:

PhD. Thesis Title: Ring Opening Polymerisation of Cyclic Oligocarbonates

Scientific Papers:

- X-ray Crystallographic Studies of Sterically Strained Cyclic Oligocarbonate Precursors for Polymerization, *Polymer*, **35**, 4707(1994).
- Solid-State Polymerisation of Cyclic Oligocarbonates, *2nd International Conference on Advanced Polymers via Macromolecular Engineering*(APME'97), Orlando, Florida, 1997.(*Oral Presentation*)

- Synthesis of Bischoformate of Bisphenol A Using Solid Triphosgene, *The First Thailand Materials Science and Technology Conference*, Bangkok, 2000.(Poster Presentation)
- Environmental Aspect of Polystyrene Foam Degradation, *The First Thailand Materials Science and Technology Conference*, Bangkok, 2000.(Poster Presentation)
- Environmental Aspect of Polystyrene Foam Degradation, *The 10th Chemical Engineering and Applied Chemistry of Thailand Conference*, Bangkok, 2000.(Oral Presentation)
- Environmental Engineering Approach on Polystyrene Foam Degradation, *IUPAC International Conference on Green Chemistry*, Delhi, India, 2001(Oral Presentation)
- Comparative Study of Polystyrene Degradation in the Open-air and Artificial Weathering Exposure, *ANTEC 2002*, San Francisco, U.S.A, 2002(Oral Presentation)
- Comparative Study of Polystyrene Degradation in the Open-air and Artificial Weathering Exposure, *The Arab. J. for Sci. & Eng.*, 27, 25, (2002)
- Effect of Photo Accelerators on the Degradation of Polystyrene Foam, *Sura. J. of Sci. and Tech.*, 11(3), (2004)
- Influence of Gate Design in Injection Mold on Properties of Injected Product, (on preparation)
- Study of The Molecular Strain of The Polymerizable Cyclic Oligocarbonates By Using The Spectroscopic Techniques, *11th International Conference on Polymers and Organic Chemistry 2004(POC'04)*, Prague, Czech Republic, 2004(proceeding)

Text Books:

- *Polymer Laboratory*, Suranaree University of Technology, 1995(in English)
- *Polymeric Materials Testing*, Suranaree University of Technology, 1996(in Thai)
- *Basic Principles of Polymerisation Processes*, Suranaree University of Technology, 1997(in Thai)
- *Physical Properties of Polymer*, Suranaree University of Technology, 1998(in Thai)

Awards and Scholarships:

- *The Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST) Scholarship* from The Institute of Promotion Teaching Science and Technology of Thailand(IPTST), 1987 - 1994

- ***Outstanding Performance in Chemistry for Undergraduate Program*** from Dr. Satang's Foundation, 1990

ประวัติผู้ร่วมวิจัย

นางสาวอรอุมา เจริญสุข เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา

ประวัติการศึกษา

ปริญญาบัณฑิตหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมพอลิเมอร์)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2544

ประสบการณ์

สหกิจศึกษา ณ บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด
แผนกอัดเมลามีน ฝ่ายผลิตเมลามีน
เขตอุตสาหกรรมสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
23 เมษายน—10 สิงหาคม 2544

ผลงานทางวิชาการ

ครั้งที่ 1 นำเสนอผลงานเรื่อง Development of Compounding Techniques for Short Fiber Reinforced Polycarbonate ในงาน An International Conference on “Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millenium” เมื่อวันที่ 22-25 กรกฎาคม 2546 ที่ กรุงเทพมหานคร

ครั้งที่ 2 นำเสนอผลงานเรื่อง Compatibilisation of Polycarbonate Reinforced with Short Glass Fiber Using Epoxy System ในงาน การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 4 เมื่อวันที่ 10-11 สิงหาคม 2547 ที่จังหวัดเชียงใหม่

ภาคผนวก

คำอธิบายชี้แจงต่อข้อสังเกตของคณะกรรมการตรวจอำนวยการวิจัย:

ประเด็นข้อที่ 1: ทำไมไม่มีผลของ POM

อธิบาย: ผู้วิจัยได้ทำงานทดลองผสมพอลิเมอร์ชนิด POM แล้ว แต่ปรากฏว่าขณะบดผสม โดยเฉพาะในเครื่องบดผสมแบบภายใน นั้น มีสารระเหย ซึ่งคาดว่าเป็นสาร Ethylene Oxide ที่ปนเปื้อนอยู่ในพอลิเมอร์ หรือ อาจเกิดจากการสลายตัวของ POM เองก็ได้ ระเหยออกมาเป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ทดลองเกิดการระคายเคืองตา แสบตา และ น้ำตาไหล ซึ่งผู้วิจัยเกรงว่าจะเป็นอันตรายกับผู้ทำการวิจัย จึงได้หยุด ไม่ได้ทำการวิจัยต่อ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาที่ถูกวิธีก็คือ การติดตั้งระบบดูดไอพิษ ในเครื่องมือบดผสม ทุกชนิด แต่เนื่องจากขาดงบประมาณ การติดตั้งระบบดูดไอพิษดังกล่าว จึงไม่สามารถดำเนินการวิจัยในส่วนของ POM ได้

ประเด็นที่ 2: เรื่องความเร็วของเครื่องบดผสมทั้ง 3 ชนิด ไม่เท่ากัน

อธิบาย: เนื่องจากเครื่องบดผสมทั้งสามชนิดมีคุณลักษณะของการบดผสมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะเรื่องการเฉือน(Shear) ในการบดผสม ถ้าพิจารณา*ระยะเวลาการเฉือน*(Shearing Time)ทั้งหมดที่ส่วนผสมถูกเฉือนระหว่างการบดผสมนั้น จะพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในเครื่องรีดแบบ 2 แกน(Twin Screw Extruder) และ 1 แกน(Single Screw Extruder) นั้นจะมีระยะเวลาเท่ากัน เนื่องจากผู้วิจัยคำนวณระยะเวลาที่ส่วนผสม(Residual Time หรือ Reaction Time) ที่ส่วนผสมอยู่ในช่องของแกนหมุน(Battel) ตั้งแต่ทางเข้า(Feed) จนถึงทางออกที่หัวรีด(Die) เท่ากันคือประมาณ 3 นาที ส่วนในเครื่องบดผสมแบบภายในนั้นในเวลามากกว่าเล็กน้อยคือ 5 นาที เพราะในช่วง 2 นาที แรก เบื้องต้นที่รอให้พอลิเมอร์เกิดการหลอม และ บดผสมเข้ากับเส้นใย ก่อน หลังจากนั้นจึงเติม สาร DDS ลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ กับ อีพอกซี ซึ่งกำหนดเวลาการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 3 นาที เท่ากับเครื่องรีดบด ผสม แต่ถ้าพิจารณาเรื่อง *จำนวนครั้งที่ส่วนผสมถูกเฉือน*(Number of Shears) นั้นเครื่องบดผสมทั้ง 3 ชนิด ก็ มีจำนวนครั้งของการถูกเฉือนใกล้เคียงกัน ถึง ถึงแม้จะใช้ความเร็วรอบ หรือ อัตราการเฉือน(Shear Rate) แตกต่างกันไป เพราะ ดังอย่างเช่น เครื่องบดผสม แบบภายในใช้ความเร็วการบดผสมที่ 60 รอบ ต่อ นาที เพราะฉะนั้นจำนวนครั้งที่ส่วนผสมถูกบดผสมในเวลา 5 นาที ก็ จะเท่ากับ 300 ครั้ง แต่ถ้าเปรียบเทียบกับเครื่องรีดบดผสมแบบ 2 แกนคู่กัน ซึ่งสมมุติมีจำนวนเกลียวการบดผสมเท่ากับ 10 เกลียว ต่อ แกน และ ใช้ระยะเวลาการบดผสมตั้งแต่จุดป้อนเข้า ถึง หัวรีด เท่ากับ 3 นาที ที่ความเร็วการบดผสมเท่ากับ 10 รอบ ต่อ นาที เมื่อคำนวณเป็นจำนวนครั้งที่ส่วนผสม ถูกบดผสมภายในเครื่องบด ก็ จะเท่ากับ 300 ครั้ง เช่นกัน จะเห็นว่า จำนวนครั้งของการบดผสมซึ่งเป็น

ตัวกำหนดประสิทธิภาพการผสมของส่วนผสมตัวหนึ่ง ไม่ได้วัดที่ความเร็วรอบของเครื่องบดผสม แต่เมื่อเปรียบเทียบ *แรงเฉือน*(Shear Stress) ระหว่างการบดผสม จะพบว่า เครื่องรีดบดผสมทั้ง 2 แบบ น่าจะใกล้เคียงกัน เพราะแรงเฉือน นอกจากจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอม ผสมกันแล้ว ยังเป็นแรงส่งให้พอลิเมอร์ผสมไหลเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและ ออกที่หัวรีด ส่วนเครื่องบดผสมแบบภายใน แรงบดผสมนอกจากได้มาจากแรงเฉือนของการหมุนของแกนบดผสมแล้ว ยังมีแรงที่มาจาก หลักรัดปิด (Ramp) ซึ่งเป็นแรงอัดอีกส่วนหนึ่งของบดผสม ส่งให้แรงเฉือนมีมากกว่า เครื่องรีดบดผสม ทั้ง 2 ชนิด

สรุป ก็คือถึงแม้ว่าเครื่องบด ทั้ง 3 ชนิด จะใช้ความเร็วรอบไม่เท่ากัน แต่จากการกำหนดระยะเวลาที่ให้ส่วนผสมอยู่ในเครื่องบดผสม ใกล้เคียงกัน ทำให้อุปมานได้ว่าจำนวนครั้งที่ส่วนผสมถูกเฉือนบดผสมจะเท่ากัน แต่ *แรง* เฉือนการผสมในเครื่องบดผสมแบบภายใน (Internal Mixer) จะมีมากกว่า เนื่องจากมีแรงจากภายนอกกดอัดลงไประหว่างการบดผสม ด้วย และแรงเฉือนที่มากกว่านี้เอง ทำให้โซ่พอลิเมอร์ และ เส้นใยเสริมแรง เกิดการขาดสั้นมากกว่าเครื่องรีดบดผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้