รายงานวิจัย

การศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์

Preparation and Properties of Polypropylene Composites with Silicon Carbide

วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์ Watthanaphon Cheewawuttipong

วรพงค์ บุญช่วยแทน Worapong Boonchouytan

รอมฎอน บูระพา Romadon Burapa

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณ ประจำปี พ.ศ. 2559

การศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์

วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์* วรพงศ์ บุญช่วยแทน และ รอมฎอน บูระพา

บทคัดย่อ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต (Polypropylene composites) โดยการเติมสารเสริมแรงจากเซรามิกส์ ทำคอมปาวด์ด้วยการหลอมผสม (Melt compounding) ศึกษาปริมาณสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) ที่สัดส่วนการผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ในพอลิโพรพิลีน 0, 10, 20, 30, และ 40 % โดยน้ำหนัก การเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting, ΔH_m) ลดลง การเกิดผลึกมีแนวโน้มลดลง จากผลการทดลองพบว่าพอลิโพรพิลีน/30 wt% ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต มีค่าการนำความร้อนสูงสุด 0.33 W/mK (อัตราการเพิ่มขึ้น 39.66 % จากพอลิโพรพิลีน) มอดูลัสของยังมากที่สุด 1628.3 MPa (อัตราการเพิ่มขึ้น 34.86% จากพอลิโพรพิลีน) ความแข็งแรงดัดมากที่สด 5.914×10^5 N/m (อัตราการเพิ่มขึ้น 37.86% จากพอลิโพรพิลีน) แต่ที่ 10wt% ของซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด 14.23 MPa (อัตราการเพิ่มขึ้น 41.31% จากพอลิโพรพิลีน) และ 40 wt% ของซิลิกอนคาร์ไบด์ มีค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสการสูญเสียสูงที่สุด เนื่องจากปริมาณสารเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง โดยซิลิกอนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน แต่ที่อัตราส่วนมากกว่า 40 wt% การเกาะกลุ่มของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้เป็นการลดความสามารถในการรับแรงของวัสดุอันเนื่องมาจากความเครียดสะสมนั่นเอง

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีแปรรูปวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Preparation and Properties of Polypropylene Composites with Silicon Carbide

Watthanaphon Cheewawuttipong*, Worapong Boonchouytan
Romdorn Burapa

Abstract

This research was to increasing the properties of polypropylene composites adding ceramics reinforcement by melt compounding process. The content of silicon carbide (SiC) at 0, 10, 30, and 40 % by weight were studied. The added silicon carbide had an effect on decreasing melting temperature, enthalpy of melting, and %crystallinity. The result showed that polypropylene/30wt% silicon carbide composites had the highest thermal conductivity 0.33 W/mK (increased 39.6%), Young's modulus 1628.3 MPa (increased 34.86%),stiffness 5.914×10^5 N/m (increased 37.86%) but 10 wt% of SiC was the highest tensile strength 14.23 MPa (increased 41.31%). And, 40 wt% of SiC showed the highest storage modulus (G') and loss modulus (G''). It might be said that the content of silicon carbide and large size of SiC particles in polypropylene matrix had influence on increasing mechanical and thermal properties of materials because decreasing the distant between silicon carbide and well dispersion. While, over 30 wt% of SiC showed the aggregated of particles and non-uniform dispersion result in reducing the efficiency to support force cause the accumerative strian in materials.

Keywords: Polypropylene, Silicon carbide, Melt compounding

Material Processing Technology Research Unit, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยสามารถทำวิจัยฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2559 สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์

ขอกราบขอบคุณครอบครัว ที่คอยส่งเสริมและเป็นกำลังใจ จนการทำวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและผู้ที่สนใจต่อไป

วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์
วรพงค์ บุญช่วยแทน
รอมฎอน บูระพา
เมษายน 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อกิตติกรรมประกาศ	(ก)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ช)
สารบัญรูป	(ซ)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขต	4
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2.1 พอลิเมอร์คอมพาวด์ดิง	8
2.2.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์	9
2.2.3 รูปแบบการใช้งานของพอลิเมอร์	9
2.2.4 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์	12
2.2.5 การนำความร้อน	15
2.2.6 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ (Polymer Rheology)	16
2.2.7 สมบัติเชิงกล	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	23
3.1 วิธีการดำเนินการทดลอง	23
3.2 วัสดุอุปกรณ์	24
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	24
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
4.1 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์	28
4.1.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำคอมปาวด์โดยการหลอมผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องผสมแบบไม่ต่อเนื่อง	28
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางคาวามร้อนของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิตด้วยเทคนิคเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลลอรีเมทรี (DSC)	29

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

หน้า

4.3 ผลการทดลองสมบัติการนำความร้อน 33
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล 34
4.4.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต 35
4.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต 37
4.5 โครงสร้างอสัญฐานของวัสดุด้วย SEM 39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 41
บรรณานุกรม 42

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติเชิงความร้อนสำหรับวัสดุต่างๆ 16

ตารางที่ 4.1 ระบบการทดลองของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์ คอมโพสิต ที่อัตราเร็วของสกูร แตกต่างกัน 29

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ 30

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุเซรามิกส์ 2

รูปที่ 1.2 ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) 3

รูปที่ 1.3 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) 3

รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการนำวัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้งาน ในชิ้นส่วนของเครื่องบิน 8

รูปที่ 2.2 เครื่องอัดรีดหรือแบบต่อเนื่อง (Extruder Machine) 13

รูปที่ 2.3 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill Mixer) 14

รูปที่ 2.4 เครื่องผสมแบบปิด 14

รูปที่ 2.5 แสดงการผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมโดยกระบวนการพอลิเมอร์คอมพาวด์ 15

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ 18

รูปที่ 2.7 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) 19

รูปที่ 2.8 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) 20

รูปที่ 2.9 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด(Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)(21

รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบและวิธีการทดสอบความต้านแรงดึง 22

รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนและกิจกรรมการดำเนินงานวิจัย 24

รูปที่ 3.2 ดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลลอรีเมทรี รุ่น Perkin Elmer DSC8500 25

รูปที่ 3.3 เครื่อง Thermal constant analyser (TPS2500S) ของ Hot disk 25

รูปที่ 3.4 สมบัติทางกล รุ่น DMA800 26

รูปที่ 3.5 สแกนนิ่งอิเลคตรอนไมโครสโคป รุ่น FEI Quanta 400 (SEM-Quanta) 26

รูปที่ 3.6 ทดสอบสมบัติทางกล 27

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาดโดยเฉลี่ย 11 ไมครอน 28

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต โดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ 2 ชนิด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 31

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงปริมาณการเกิดผลึก (%Crystallinity) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต โดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ 2 ชนิด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 31

หน้า

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting, ΔH_m) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC โดยคำนวณจากพื้นที่ใต้โค้ง พอลิโพรพิลีน (ข) พอลิโพรพิลีน/10%wt ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต (ค) พอลิโพรพิลีน/30%wt ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต 32

รูปที่ 4.5 ค่าการนำความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต 33

รูปที่ 4.6 มอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต 34

รูปที่ 4.7 ความแข็งแรงดัด (Stiffness) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต 35

รูปที่ 4.8 ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต 36

รูปที่ 4.9 ค่าโมดูลัสการสูญเสีย (Loss modulus) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต 36

รูปที่ 4.10 โครงสร้างอสัณฐานเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนๆต่างในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน (a) PP/10wt%SiC composites, (b) PP/30wt%SiC compositesและ (c) PP/40wt%SiC composites 37

รูปที่ 4.11 โครงสร้างอสัณฐานเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ 30wt% โดยความเร็วของสกรู (a) 50 rpm (b) 100 rpm และ (c) 150 rpm 38

รูปที่ 4.12 โครงสร้างอสัณฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) 39

รูปที่ 4.13 โครงสร้างอสัณฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่อัตราส่วน 30 wt% (a) อนุภาคขนาด 11 ไมครอน (SiC-S) และ (b) อนุภาคขนาด 43 ไมครอน (SiC-L) 40

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

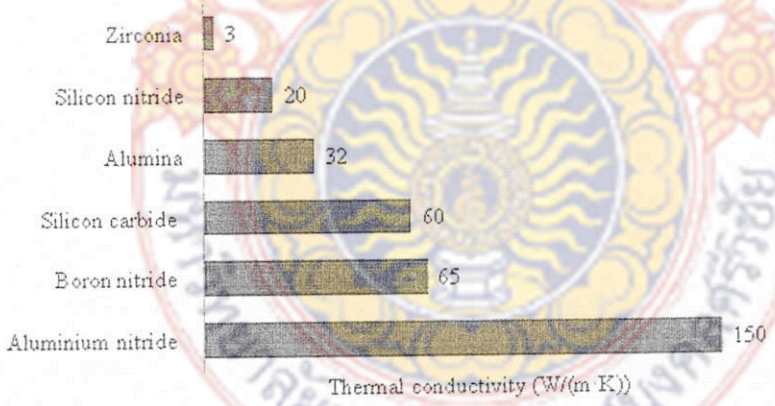
ในปัจจุบันงานวิจัยทางด้านวัสดุ มีบทบาทต่อการเพิ่มศักยภาพด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ ด้วยเหตุนี้การพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ เพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหรรกมอากาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเลคทรอนิคส์ และอื่นๆ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบ (Composites) สามารถรวมสมบัติที่ดีของวัสดุมากกว่าสองชนิดไว้ด้วยกัน ซึ่งไม่สามารถมีในวัสดุชนิดเดียวได้ ซึ่งวัสดุผสมประกอบด้วยสองเฟสหลักคือเฟสเนื้อพื้น (Matrix) และเฟสที่กระจายซึ่งเป็นเฟสเสริมแรง (Filler หรือ Reinforcement) โดยที่เฟสที่กระจายสามารถเป็นเม็ดผง เส้นใยสั้น หรือ เส้นใยยาว เป็นต้น โดยทั่วไปสมบัติของวัสดุเผสมจะมีค่าเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างสมบัติของวัสดุเนื้อพื้นและเฟสที่กระจาย การจำแนกตามวัสดุเนื้อพื้น แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ(Metal matrix composites) วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก (Ceramic matrix composites) วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Poymer matrix composites) หรือพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) ซึ่งพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุด เพราะมีคุณสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิห้อง น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนจากสารเคมี กระบวนการผลิตไม่ยุ่งยาก ขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกส์

อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเลคทรอนิคมีบทบาทสำคัญในการสร้างรายได้ให้แก่ประเทศและเป็นกลไกลสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งอุปกรณ์และชิ้นส่วนอิเลคทรอนิคที่ใช้ในชีวิตประจำวันหรือในงานอุตสาหกรรมมีความต้องการวัสดุดูดซับความร้อน (Heat sink) เพื่อช่วยในการระบายความร้อนสู่ภายนอก และเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุ เช่น หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ในคอมพิวเตอร์มีความเร็วเพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูง การระบายความร้อนด้วยพัดลมเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีแผ่นระบายความร้อนประกอบกับพัดลม ซึ่งวัสดุที่นำมาทำแผ่นระบายความร้อน เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งความร้อนจะกระจายผ่านครีบและส่งต่อไปยังช่องระบายความร้อนสู่ภายนอก วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นอะลูมิเนียม เนื่องจากมีความสามารถในการนำความร้อนสูง (Thermal conductivity) และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ เนื่องจากฮีทซิงค์มีรูปร่างซับซ้อน ส่งผลให้กระบวนการผลิตหลายขั้นตอน ทำให้ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง ส่งผลให้นักวิจัยหลายท่านได้เล็งเห็นความสำคัญของวัสดุดูดซับความร้อนหรือวัสดุนำความร้อน (High thermal conductivity materials) ซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์และชิ้นส่วนอิเลคทรอนิคส่งผลให้มีการพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติการนำความร้อนกำลังเป็นสนใจอย่างกว้างขวาง อันเนื่องมากจากข้อได้เปรียบด้านน้ำหนัก สามารถขึ้นรูปที่ซับซ้อนได้ ราคาถูก ถึงแม้ว่าสมบัติการนำความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะด้อยกว่าอะลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ตาม

ความสามารถการนำความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านการระบายความร้อน (Thermal management) เช่น หลอดไฟ LED ฮีทซิงค์ เป็นต้น

นักวิจัยได้ทำการศึกษาการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล ทางความร้อน และอื่นๆ ของพอลิเมอร์โดยการเติมสารเสริมแรงหลากหลายชนิด เช่น โลหะ คาร์บอน (คาร์บอนแบล็ค คาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนไฟเบอร์) โบรอนไนไตรด์ อลูมินา [1] อลูมิเนียมไนไตรด์ [2,3] ไมกา ซิงค์ออกไซด์ [4] ซิลิกอนคาร์ไบด์ [5] เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต คือ ชนิด ขนาดและรูปร่าง คุณสมบัติ ปริมาณ การกระจายตัวของสารเสริมแรง และพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้น พอลิเมอร์คอมโพสิตจะผลิตด้วยการทำคอมปาวด์โดยการหลอมผสม (Melt compounding) ด้วยเครื่องอัดรีดหรือแบบต่อเนื่อง (Extruder machine) และ เครื่องผสมแบบแบตหรือแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch mixer)

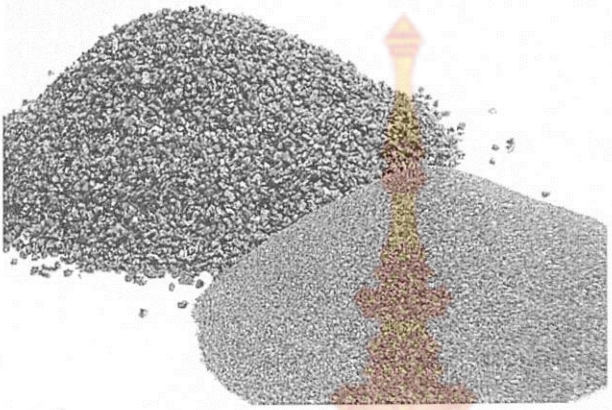
ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มคุณสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต ประกอบด้วย การเลือกใช้วัสดุเป็นวัสดุเนื้อพื้น สารเสริมแรง แกระบวนการผสม อุณหภูมิการหลอม การรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างวัสดุเนื้อพื้นและสารเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต ส่งผลให้เกิดงานวิจัยแนวใหม่ที่ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เกิดจากผสมระหว่างวัสดุเสริมแรงที่มากกว่าหนึ่งชนิด ที่มีรูปร่าง ขนาด และชนิดที่แตกต่าง พบว่าการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงที่นำมาผสมกัน ทำให้การจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงมีความหนาแน่นกว่าการเติมด้วยสารเสริมแรงเพียงชนิดเดียว ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดนี้ มีสมบัติเชิงกล การนำความร้อน การขยายตัวทางความร้อนที่เหนือกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเติมเพียงชนิดเดียว ที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน [6-7]



รูปที่ 1.1 ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุเซรามิกส์
(Measuring according to JIS R 1611-1997 by Kyocera Corporation.)

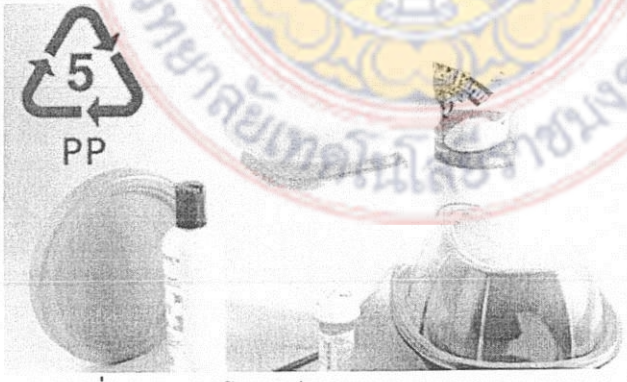
ในปัจจุบันงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเติมสารเสริมแรงจากวัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติการนำความร้อนและสมบัติทางกล ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย จากรูปที่ 1 แสดงความสามารถความร้อนของวัสดุเซรามิกส์ พบว่าอะลูมิเนียมไนไตรด์(Aluminium nitride, AlN) มีความสามารถในการนำความร้อนดีที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ อันรองลงมาโบรอนไนไตรด์

(Boron nitride, BN) และซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) เมื่อเปรียบเทียบเชิงราคาพบว่า อะลูมิเนียมไนไตรด์ และซิลิกอนคาร์ไบด์ มีราคาถูกกว่าโบรอนไนไตรด์



รูปที่ 1.2 ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC)
(ที่มา https://thai.alibaba.com/product-detail/black-silicon-carbide-1465203595.html สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2559)

ซิลิกอนคาร์ไบด์ ผลิตโดยอุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของทรายและคาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีเสถียรภาพทางเคมี การนำความร้อนสูง ความต้านทานการสึกหรอดี มีความแข็งแรง โดยซิลิกอนคาร์ไบด์นิยมนำมาใช้งานเป็นวัสดุขัดถู ซีลด์ แบริ่ง วัสดุระบายความร้อน ชิ้นส่วนของเทอร์ไบร์ เป็นต้น และอะลูมิเนียมไนไตรด์ มีการค้นพบและได้รับการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ซึ่งวัสดุนี้มีคุณสมบัติเด่น มีความเป็นฉนวนที่ดี มีการนำความร้อนสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับซิลิกอนคาร์ไบด์ วัสดุนี้นิยมมาใช้ทำแผ่นรองวงจรสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ฮีตซิงค์ ชิ้นส่วนไมโครเวฟ เป็นต้น วัสดุทั้งสองชนิดนี้ เป็นวัสดุกลุ่มเซรามิกส์ที่มีสมบัติโดดเด่นทางสมบัติการนำความร้อน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลให้วัสดุเชิงประกอบอีกด้วย



รูปที่ 1.3 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)
(ที่มา http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1611/polypropylene-pp สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2559)

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ ที่มีสมบัติเชิงกลและทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน และนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนและมีความแข็งแรงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะและเซรามิกส์ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน โดยการเลือกใช้สารเติมกลุ่มเซรามิกส์ที่มีสมบัติการนำความร้อนสูง คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ และ อะลูมิเนียมไนไตรด์ ทำการผสมโดยการทำคอมปาวด์ด้วยการหลอมผสม อีกทั้งทำการศึกษาผลกระทบของการเติมสารเติมเพียงชนิดเดียวกับสารเติมจากการผสมระหว่างซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อผลิตพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตจากซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นทั้งในเชิงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน โดยการเติมสารเสริมแรงในปริมาณที่ต่ำ เพื่อรักษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนและการกระจายตัวของสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ ในพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการคอมปาวด์พอลิเมอร์ผสมระว่างพอลิโพรพิลีนกับสารเสริมแรงคือซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยการหลอมผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนและการกระจายตัวของสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ และรูปร่าง ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถผลิตพอลิโพรพิลีน์คอมโพสิต โดยใช้สารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์

1.4.2 สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนโดยการสารเสริมแรงจากซิลิกอนคาร์ไบด์ เพื่อสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุอีกทางหนึ่ง

1.4.3 คาดว่างานวิจัยฉบับนี้จะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีสมัยใหม่ต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการในวัสดุทั่วไปเช่นโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ วัสดุเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมทางด้านอากาศยาน การขนส่ง อุตสาหกรรมอุปกรณ์และชิ้นส่วนอิเลคทรอนิค เป็นต้นโครงการวิจัยมีกรอบแนวความคิดคือ ศึกษาปริมาณการเติมและความสามารถในการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์ในวัสดุเนื้อพอลิโพรพิลีน ที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติของวัสดุผสม

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yu และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่มีสามารถนำความร้อนได้ดี โดยการผสมระหว่างพอลิสไตรีนกับอลูมิเนียมไนไตรด์(AlN) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของสารเสริมแรงในวัสดุผสม ทำการศึกษาถึงปัจจัยของปริมาณของสารเสริมแรง ขนาดของพอลิสไตรีน และอุณหภูมิ จากผลการทดลองพบว่าพอลิสไตรีนคอมโพสิตที่เติมอะลูมิเนียมไนไตรด์20% โดยปริมาตร มีสมบัติการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่าของพอลิสไตรีน พอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนของพอลิสไตรีน/อลูมิเนียมไนไตรด์คอมโพสิต นอกจากนี้ยังมีการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์การนำความร้อนของวัสดุผสมอีกด้วย

Xu และคณะ [2] ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมอะลูมิเนียมไนไตรด์ต่อสมบัติของพอลิไวนิล ลิดีนฟลูออไรด์(PDVF)คอมโพสิตหรืออีพ็อกซีจากผลการทดลองพบว่าการเติมอะลูมิเนียมไนไตรด์มีผลต่อลดความแข็งตึง มอดูลัส และความเหนียวของพอลิเมอร์เนื้อ และมีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมโดยการดูดซับความชื้น ที่ปริมาณการเติมอะลูมิเนียมไนไตรด์60% โดยปริมาณ จะมีค่าการนำความร้อนสูงที่สุด

Jung และคณะ [3] รายงานว่าสารเติมที่เป็นสารอินินทรีย์และอินทรีที่เติมในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อิเลคทรอนิคแพคเกจ การอพทย์ เครื่องมือยานยนต์ เป็นต้น ซึ่งสารเติมเหล่านี้มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล ความร้อน การนำไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ทั่วไป นอกจากนี้นักวิจัยพบว่าโบรอนไนไตรด์เมื่อเติมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้วัสดุผสมดังกล่าวมีสมบัติโดเด่นในด้านการนำความร้อนและเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อนุภาคขนาดเล็กโบรอนซ์มีผลสำคัญต่อการประสิทธิภาพการไหลในกระบวนการผสม

Choi และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุผสมที่มีการเติมด้วยอะลูมิเนียมไนไตรด์และโบรอนไนไตรด์ พบว่า พอลิเมอร์โบรอนไนไตรด์คอมโพสิตมีการนำความร้อนและความเป็นฉนวนที่ดีกว่าพอลิเมอร์อะลูมิเนียมไนไตรด์ เนื่องจากอะลูมิเนียมไนไตรด์เมื่อสัมผัสกับความชื้น จะทำให้เกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งสารดังกล่าวมีผลต่อการลดประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุผสม

Shin และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณและขนาดของโบรอนซ์ไนไตรด์ที่เติมในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พบว่าสมบัติการนำความร้อน การแพร่กระจายความร้อน ความร้อนที่แฝงที่ใช้ในการสลายพันธะ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโบรอนไนไตรด์ที่ใช้ เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารเติมเท่ากัน พบว่าโบรอนไนไตรด์ที่มีขนาดใหญ่จะมีประสิทธิภาพความร้อนที่

ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก อีกทั้งทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องการผสมอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันของโบรอนไนไตรด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมด้วยโบรอนด์ไนไตรด์ที่ผสมระหว่างอนุภาคต่างขนาดกัน มีการนำความสูงกว่าการเติมด้วยโบรอนไนไตรด์เพียงขนาดเดียว อีกนัยหนึ่งการจัดเรียงตัวของโบรอนไนไตรด์มีผลต่อการเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง

Zhou และคณะ [5] นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดและการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์ต่อสมบัติการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณและขนาดของโบรอนไนไตรด์มีผลต่อการเพิ่มสมบัติการนำความร้อน โดยการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์มีส่วนสำคัญต่อสร้างเครือข่ายการนำความร้อนในพอลิเมอร์เมทริกซ์

ประณัฐโพธิยะราช [6] พอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ นำเสนอว่า แต่เดิมพอลิเมอร์ที่ใช้ ส่วนใหญ่จะมาจากธรรมชาติ จนกระทั่งประมาณ 30 ปีที่แล้ว อุตสาหกรรมปิโตรเคมีเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น จึงมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ มาทดแทนของเดิมที่ใช้อยู่ เช่น ขวดพลาสติกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ มาใช้แทนขวดแก้ว ฯลฯ แต่ปัจจุบันแหล่งทรัพยากรทางปิโตรเคมีเริ่มมีปริมาณน้อยลง แนวโน้มการวิจัยด้านพอลิเมอร์ จึงหันมาใช้พอลิเมอร์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติมากขึ้น สำหรับการวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นการนำ พอลิเมอร์สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะหรือเป็นการนำลักษณะเด่นของพอลิเมอร์ แต่ละชนิดมารวมกัน ผู้วิจัยเลือกใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ประเทศไทยสามารถผลิตขึ้นเองได้ และยัง เป็นประเทศที่ส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลกอีกด้วย จึงต้องการนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติให้สูงขึ้น โดยนำมา ผสมกับอีพอกซีเรซิน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรง มักใช้ในการเสริมแรงให้กับเส้นใยชนิดต่างๆ เช่น ใช้ในการผลิต ชิ้นส่วนจักรยานเสือภูเขา ชิ้นส่วนเครื่องบิน ฯลฯ ซึ่งจะช่วยเสริมความเหนียวของยางธรรมชาติ และลดความเปราะของอีพอกซีเรซิน

Teng et al. [14] ได้ทำการศึกษาอีพอคซี่คอมโพสิตโดยการเติมไฮบริดฟิลเลอร์ที่ผสมระหว่างมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNT) กับอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) จากผลการทดลองพบว่าการผสมระหว่างสารเติมสองชนิดที่มีรูปร่างแตกต่างกันนั้น เป็นผลให้เกิดการจัดเรียงตัวและสร้างเน็ตเวิร์คระหว่างสารเติม ทำให้คุณสมบัติการนำความร้อน สมบัติเชิงกลของอีพอคซี่คอมโพสิตเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการเติมด้วยสารเติมเพียงชนิดเดียวที่มีปริมาณสารเติมที่เท่ากัน

Andrew et al. [15] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ของเซรามิกส์คอมโพสิตจากอะลูมิเนียมไนไตรด์ โบรอนไนไตรด์ และซิลิกอนคาร์ไบด์ จากการทดลองพบว่าความแข็งและความสามารถในการนำความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งขนาดอนุภาคของเซรามิกส์มีผลต่อสมบัติของเซรามิกส์คอมโพสิต

Peter et al. [16] รายงานว่าได้ผลิตวัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ โดยกเกิดจากหลอมของสไครลีนเอทาลีน บิวทีลีน (styrene ethylene butylenes) กับซิลิกอนคาร์ไบด์ในอัตราส่วนต่างๆ ซิลิกอนคาร์ไบด์การกระจายอย่างสม่ำเสมอ เกิดโครงสร้างเครือข่ายของสารอินทรีย์ในพอลิเมอร์ การเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ส่งผลให้ค่า โมดูลัสการสะสม (Storage modulus) เพิ่มสูงขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการทนทานต่อการเสียรการเสียรูปจากความร้อน

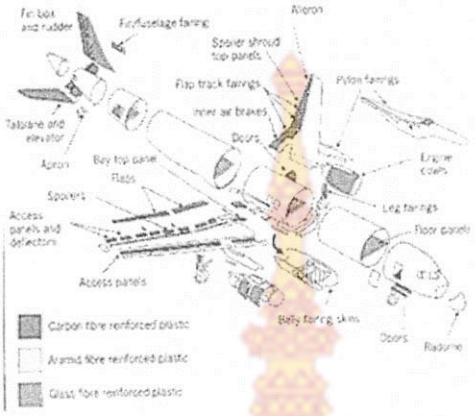
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุพอลิเมอร์มีการพัฒนาและนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านวิศวกรรม อุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมยานยนต์ บรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมพอลิเมอร์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญยิ่งต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับระบบเศรษฐกิจของประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับผู้ประกอบการเป็นจำนวนมาก โดยมีจำนวนโรงงานที่ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยตรงกว่าสามพันโรงงานทั่วประเทศ อีกทั้งยังมีจำนวนโรงงานที่เกี่ยวเนื่องกับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกมากมายเป็นต้น พอลิเมอร์เป็นที่นิยมเนื่องจากมีราคาถูก น้ำหนักเบา ทนความชื้นได้ดี ไม่เป็นสนิม ทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ตามต้องการได้ง่ายกว่าโลหะ เป็นฉนวนไฟฟ้า มีทั้งชนิดโปร่งใสและมีสีต่างๆ กันด้วยเหตุนี้พอลิเมอร์จึงใช้แทนโลหะหรือวัสดุบางชนิด เช่น แก้ว ได้เป็นอย่างดีถึงแม้ว่าสมบัติของพอลิเมอร์จะไม่เทียบเท่ากับโลหะหรือเซรามิกส์ ส่งผลให้การนำพอลิเมอร์ไปใช้งานหรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เลยนั้นเป็นไปได้น้อย ซึ่งโดยปกติแล้วจะต้องนำพอลิเมอร์ไปผสมกับสารอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเสริมและปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ให้มีความคงทนต่อการใช้งานมากขึ้น หรือเรียกว่าวัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites: PMCs)โดยพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้น และสารเติม (Filler หรือ Additive) หรือสารเสริมแรง (Reinforcing Filler) เป็นของแข็งที่ใส่ในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับสมบัติเชิงกล สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติการนำความร้อนของพอลิเมอร์ วัสดุชนิดนี้ได้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านวัสดุวิศวกรรมและใช้ในปริมาณมากที่สุด เพราะมีคุณสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิห้อง ง่ายต่อการผลิตและราคาถูก [7]

เทคโนโลยีของการผลิตพอลิเมอร์ก้าวหน้าขึ้นอย่างรวดเร็ว พลาสติกเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้กัน สามารถแปรรูปเป็นชิ้นงานได้หลายรูปแบบ ทั้งในการแพทย์และอื่นๆ พอลิเมอร์สังเคราะห์หลายประเภทนำมาใช้เป็นสารช่วยยึดติดอย่างที่รู้จักกันคือ กาวลาเท็กซ์ ทางด้านการเกษตรใช้พลาสติกพีวีซีคลุมดินเพื่อรักษาความชุ่มชื้นและป้องกันการถูกทำลายของผิวดิน ใช้ทำตาข่ายกันแมลงในการปลูกผักปลอดสารพิษ ช่วยกักเก็บน้ำในพื้นที่ที่เป็นดินร่วนซุยและยังใช้เมล็ดพลาสติกผสมในดินเหนียวช่วยให้ดินร่วนอีกด้วย โฟมเป็นพลาสติกที่ผ่านกระบวนการเติมแก๊สเพื่อให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากแทรกอยู่ตามเนื้อพลาสติกโฟมมีน้ำหนักเบามีความยืดหยุ่นกันหรือเก็บความร้อนได้ดี บางชนิดมีสาร CFC แทรกอยู่เป็นฉนวนความร้อนและฉนวนไฟฟ้าได้ดีมากจึงนิยมใช้บรรจุอาหาร แต่ในปัจจุบันทราบแล้วว่าสาร CFC ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกจึงมีการศึกษาวิจัยใช้สารอื่นทดแทนพบว่าแก๊สบิวเทนและเพนเทนสามารถนำมาใช้ผลิตแทนได้ ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีด้านพอลิเมอร์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ใช้อำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันตัวอย่างการนำไปใช้งานในชิ้นส่วนทางอากาศยานแสดงรูปที่ 2.1

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ จึงได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้กระบวนการหนึ่งที่สำคัญคือการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไปในพอลิเมอร์เรียกว่า พอลิเมอร์คอมพาวด์ดิง (Polymer Compounding) ซึ่งจะต้องทำให้สารเติมแต่งกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ และเรียกของผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่งที่ได้นี้ว่า คอมพาวด์ (Compound) ซึ่งเครื่องที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย เครื่องอัดรีดหรือ

แบบต่อเนื่อง (Extruder Machine) และ เครื่องผสมแบบชุดหรือแบบไม่ต่อเนื่อง (Internal Mixer) [8]



รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการนำวัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้งาน ในชิ้นส่วนของเครื่องบิน[8]

2.2.1 พอลิเมอร์คอมพาวด์ดิง

พอลิเมอร์ หมายถึง สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆกันมาต่อเข้าด้วยกัน และได้มาจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันมี 2 ประเภทดังนี้

พอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่หรือแบบรวมตัว (Chain or Addition Polymerization) กลไกหลักของการเกิดปฏิกิริยานี้ อาจเป็นแบบฟรีแรดิกัล (Free Radical) หรือ แบบอิออนิก (Ionic) ก็ได้ แต่ที่ใช้กันมากคือแบบฟรีแรดิกัล แต่ปฏิกิริยาทั้งสองแบบต่างเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ สารริเริ่ม (Initiator) ที่นิยมใช้เป็นสารพวก เปอร์ออกไซด์อินทรี (Organic Peroxide) และเปอร์ออกไซด์อนินทรีย์ (Inorganic Peroxide) พอลิเมอร์ที่สำคัญทางการค้า เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นพลาสติกใช้ทำกระเบื้องยางและท่อ, พอลิอะคริโลไนไตรล์เป็นเส้นใย ใช้ทำผ้า และพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นพลาสติกใส ใช้ทำวัสดุใสแทนกระจก

พอลิเมอไรเซชันแบบขั้นหรือแบบควบแน่น (Step or Condensation Polymerization) โดยทั่วไปใช้มอนอเมอร์ 2 ชนิดที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวสองหมู่ในโมเลกุล กลไกการเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างกับการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของโมเลกุลเล็กๆ เช่น ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) มอนอเมอร์กลุ่มสำคัญที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น กลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกกลุ่มอะมีน และกลุ่มอะซิดแอนไฮไดรด์ เป็นต้น พอลิเมอร์ที่สำคัญทางการค้า เช่น พอลิเอสเทอร์จากเอทิลีนไกลคอล และไดเมทิลทาเรฟทาเลต และเส้นใยไนลอน ซึ่งเป็นพอลิเอไมด์ เป็นต้น แต่ถ้าเป็นมอนอเมอร์ที่แสดงสมบัติเฉพาะตัวมากกว่า 2 หมู่ โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ได้จะเกิดเป็นกิ่งก้านสาขา และกิ่งก้านสาขานั้นอาจเกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลหรือกับโมเลกุลอื่น เกิดเป็นพอลิเมอร์เชื่อมโยง (Crosslinked Polymer) หรือ พอลิเมอร์แบบร่างแห (Network Polymer)

ชนิดของพอลิเมอร์แบ่งตามโครงสร้างของโมเลกุล เราสามารถแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1) Chain Length Polymer เป็นพอลิเมอร์สายตรงไม่มีกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงของมอนอเมอร์จัดเรียงกันเป็นระเบียบทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเมอร์ชนิดนี้มีลักษณะขุ่นๆ ความหนาแน่นสูง จุดหลอมเหลวสูง

2) Branched Polymer เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเป็นลักษณะมีกิ่งก้านออกจากยาวหลัก การจัดเรียงของมอนอเมอร์ค่อนข้างไม่เป็นระเบียบซึ่งไม่สามารถนำพอลิเมอร์ทั้งสองเส้นเข้ามาชิดติดกันได้ ทำให้ความหนาแน่นน้อยลง เมื่อให้ความร้อนจุดเดือดจะต่ำกว่าแบบเส้นตรง ความเหนียวต่ำแต่พอลิเมอร์แบบกิ่งสามารถยืดหดได้ตามแรงดึงหรือแรงที่กระทำ

3) Croos -Linking Polymer เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลอย่างหนาแน่นเป็นการยึดจับกันของมอนอเมอร์เป็นโครงสร้างตาข่ายแบบร่างแห ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลขยับตัวยากเมื่อได้รับแรงหรือความร้อน วัสดุที่มีพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นองค์ประกอบหลัก จึงรับแรงได้ดี แข็งแรงแต่เปราะและไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อความร้อนสูงถึงอุณหภูมิสลายตัว (DegradationTemperature) วัสดุจะสลายตัวไปเนื่องจากพันธะเคมีแตกหัก พอลิ เมอร์ชนิดนี้ เป็นส่วนประกอบหลักในพลาสติกแข็ง เช่น ถ้วยชามเมลามีน หลังคาไฟเบอร์ (Thermosets เสริมใยแก้ว)

2.2.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์

การสังเคราะห์พอลิเมอร์เป็นกระบวนการของการรวมโมเลกุลขนาดเล็กๆ ที่เป็นหน่วยย่อยเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในระหว่างกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ หมู่ทางเคมีบางตัวจะหลุดออกจากหน่วยย่อย หน่วยย่อยในพอลิเมอร์จะเป็นหน่วยซ้ำๆกัน การสังเคราะห์ในห้องแลบ วิธีการในห้องแลบแบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือการสังเคราะห์แบบควบแน่นและการสังเคราะห์แบบเติม อย่างไรก็ตาม วิธีการที่ใหม่กว่าเช่นการสังเคราะห์แบบของเหลว ไม่สามารถจัดเข้าในกลุ่มใดได้ ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์อาจเกิดขึ้นโดยมีหรือไม่มีตัวเร่งก็ได้ ในปัจจุบันมีการศึกษาทางด้านการสังเคราะห์พอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่นโปรตีนในห้องแลบ

การสังเคราะห์ทางชีวภาพ พอลิเมอร์ธรรมชาติมีสามกลุ่มคือ พอลิแซคคาไรด์ พอลิเพปไทด์และพอลินิวคลีโอไทด์ ในเซลล์ พอลิเมอร์เหล่านี้ถูกสังเคราะห์ด้วยเอนไซม์ เช่นการสร้างดีเอ็นเอด้วยเอนไซม์ดีเอ็นเอ พอลิเมอเรส การสังเคราะห์โปรตีนเกี่ยวข้องกับการใช้เอนไซม์ที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับการถอดรหัสทางพันธุกรรมในดีเอ็นเอ แล้วจึงถ่ายทอดรหัสจากดีเอ็นเอเป็นข้อมูลของลำดับกรดอะมิโน โปรตีนอาจถูกดัดแปลงหลังจากการแปลรหัสเพื่อให้มีโครงสร้างเหมาะสมกับการทำงาน การดัดแปลงพอลิเมอร์ธรรมชาติ พอลิเมอร์ที่มีความสำคัญในทางการค้าหลายชนิดสังเคราะห์จากการดัดแปลงพอลิเมอร์ธรรมชาติทางเคมี ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาระหว่างกรดไนตริกกับเซลลูโลส เกิดเป็นไนโตรเซลลูโลส และการทำให้ยางธรรมชาติแข็งตัวโดยการเติมกำมะถัน

2.2.3 รูปแบบการใช้งานของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่เรามีการใช้งานในชีวิตประจำวันนั้น สามารถแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพได้ออกมากว้างๆ ได้ 4 แบบ ก็คือ

1) เส้นใย เป็นพอลิเมอร์กลุ่มที่แข็งแรงที่สุด เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยนั้นมีขนาดที่เล็กมาก ตัวพอลิเมอร์เองจึงจำเป็นต้องรับแรงในแนวแกนเส้นใยให้ได้สูงสุด เส้นใยจึงมีลักษณะทางกายภาพที่ดูเบาบาง แต่มีความแข็งแรงสูง

2)พลาสติก มีความแข็งแรงรองจากเส้นใย แม้ว่าการใช้งานพลาสติกนั้น จะมีมิติความกว้าง ยาว สูง มากกว่าเส้นใยหลายเท่า ทำให้ดูเหมือนว่าแข็งแรงกว่าเส้นใย แต่ถ้าลองนำพลาสติกไปฉีดให้มีความบางเท่าเส้นใย จะพบว่ามันแข็งแรงน้อยกว่ามาก

3) ยาง มีจุดเด่นคือความยืดหยุ่นสูง เราจึงไม่เปรียบเทียบเรื่องความแข็งแรง แต่มักจะคำนึงถึงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาด (Elongation at Break) และแรงดึงที่จุดขาด (Load at Break) แทน นอกจากนี้พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จำเป็นต้องมีการคืนตัวกลับได้ดีด้วย (Recovery Property) จึงต้องมีการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่โมเลกุลด้วยการเชื่อมขวาง (Crosslink) ซึ่งจุดที่เชื่อมขวางนี้ควรจะอยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสม เนื่องจากหากถี่เกินไป ยางที่ได้จะมีลักษณะแข็งไม่ยืดหยุ่น ในขณะที่ถ้าห่างเกินไป ก็จะได้ยางที่มีลักษณะนิ่มเกินไป

4) สารละลายและลาเทกซ์ ใช้งานในรูปของพอลิเมอร์ที่กระจายตัวในของเหลวอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นตัวทำละลายของพอลิเมอร์เอง หรือกระจายตัวเป็นอิมัลชันในน้ำ ลักษณะการใช้งานคือเป็น กาว สีทาบ้าน เซลแล็ค หรือ สารเคลือบผิวอื่น ๆ พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ควรจะกระจายตัวได้ดี และมีความสามารถในการเชื่อมขวางได้ในสภาวะที่มีแสง หรือแก๊สออกซิเจนได้ หรือไม่ก็สามารถที่จะนำตัวเองไปเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัสดุอื่นๆ ได้

พลาสติก หมายถึง วัสดุที่ได้จากการนำพอลิเมอร์มาแปรรูปโดยการใช้ความร้อนและความดัน และมักผ่านการปรับปรุงสมบัติเพื่อให้นำมาแปรรูปและใช้งานได้โดยการผสมสารเติมแต่งลงไปการนำเอาพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไปใช้ในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการนั้น โดยปกติแล้วจะต้องนำพอลิเมอร์มาผสมกับสารอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อเสริมให้พอลิเมอร์มีสมบัติดีขึ้นและคงทนต่อการใช้งานมากขึ้นหรือช่วยให้กระบวนการผลิตได้ง่ายขึ้น สารอื่นที่ผสมลงไปด้วยนี้ เรียกว่าสารเติมแต่ง (Additives) นอกจากนี้ยังมีสารเสริมแรงบางชนิดใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้สารเติมแต่งอีกชนิดหนึ่ง การผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไปในพอลิเมอร์เรียกว่าพอลิเมอร์คอมพาวด์ดิง (Polymer Compounding) ซึ่งจะต้องทำให้สารเติมแต่งกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ และเรียกของผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่งที่ได้นี้ว่า คอมพาวด์ (Compound) โดยสารเติมแต่งที่ใส่นิยมกำหนดเป็นส่วนโดยน้ำหนักต่อพอลิเมอร์ ๑๐๐ ส่วน(PHR: Parts per Hundred of Resin)

โดยทั่วไปแล้ว สารเติมแต่งที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์ (Polymer Additives) ควรมีคุณสมบัติดังนี้ ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เสถียรภาพใต้สภาวะการขึ้นรูป เสถียรภาพใต้สภาวะการใช้งาน ไม่เป็นพิษและไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรส ไม่เกิดการคายสี (Bleeding) หรือหารเป็นฝ้า (Blooming) มีราคาถูก ไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป เป็นต้น เมื่อนำไปผสมกับพอลิเมอร์ สารเติมแต่งบางชนิด เช่น ฟิลเลอร์ (Fillers) เส้นใยเสริมแรง (Reinforcing Fibers) จะไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ ในขณะที่สารเติมแต่งบางชนิด เช่น สารกันออกซิเดชัน (Antioxidant) สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงยูวี (UV Stabilizer) ละลายในพอลิเมอร์ได้สมบูรณ์ สำหรับสารดัดแปรสมบัติที่มีพื้นผิวสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้อย่างจำกัด จึงมักเคลื่อนย้าย (Migrate) มาที่พื้นผิว ซึ่งอาจทำให้พื้นผิวของพอลิ

เมอร์เกิดความเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้ปริมาณสารเติมแต่งแต่ละชนิดที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์จะไม่เท่ากัน ฟิลเลอร์ ได้แก่ สารเติมแต่งซึ่งเป็นของแข็งที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์ เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ฟิลเลอร์ที่ใช้กันทั่วไป มีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ แต่ส่วนใหญ่แล้วมักเป็นสารอนินทรีย์สำหรับฟิลเลอร์ที่ใช้เพื่อเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิต อาจเรียกชื่อได้อีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์เทนเดอร์ (Extenders) หรือ อินเนอร์ตฟิลเลอร์ (Inert Filler) ซึ่งการใส่ฟิลเลอร์ประเภทนี้ช่วยในการปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ด้วย ส่วนฟิลเลอร์ที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆ เรียกว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (Functional Fillers หรือ Active Fillers) และมักจะเรียกฟิลเลอร์ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ให้กับพอลิเมอร์ว่า ฟิลเลอร์เสริมแรง (Reinforcing Fillers หรือ Reinforcement)

เฟสเนื้อพื้น (The Matrix Phase) ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยอาจจะเป็นโลหะ พอลิเมอร์หรือเซรามิก โดยทั่วไปแล้วโลหะและพอลิเมอร์จะถูกนำมาใช้เป็นเนื้อพื้นเพราะมีความเหนียวตามต้องการ ส่วนวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก ใช้เสริมแรงเพื่อวัตถุประสงค์ปรับปรุงความต้านทานต่อการแตกหัก ในวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย เนื้อพื้นจะมีหน้าที่หลายประการ ประการแรกต้องประสานกับเส้นใยอย่างดีและทำหน้าที่ตัวกลางในการถ่ายโอนแรงหรือความเค้นจากภายนอกและการกระจายไปสู่เส้นใย ตัวเนื้อพื้นเองจะรับแรงการกระทำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นเนื้อพื้นจะต้องเหนียวผนวกกับมอดุลัสของเส้นใยควรจะสูงกว่ามอดุลัสของเนื้อพื้นมาก หน้าที่ประการที่สองของเนื้อพื้นคือการป้องกันเส้นใยไม่ให้เกิดความเสียหายที่ผิวซึ่งอาจจะมาจากสาเหตุการเสียดสีทางกลหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสภาพแวดล้อม ปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดตำหนิที่ผิด ซึ่งต่อมากลายเป็นรอยแตกขึ้นและนำไปสู่การแตกหักเสียหายที่ระดับความเค้นต่ำได้ หน้าที่ประการสุดท้ายคือเนื้อพื้นต้องแยกเส้นใยออกจากกันและด้วยความนิ่มและความเป็นพลาสติกของเนื้อพื้นจะทำหน้าที่ป้องกันการขยายตัวของรอยแตกจากเส้นใยหนึ่งไปเส้นใยหนึ่งซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเสียหายอย่างทันทีทันใด อาจจะกล่าวได้อีกอย่างว่าเนื้อพื้นต้องมีตัวขัดขวางการขยายตัวของรอยแตกแม้ว่าจะมีเส้นใยบางเส้นที่เกิดการแตกหักแต่การแตกหักของวัสดุผสมยังไม่เกิดขึ้นจนกว่าเส้นใยส่วนใหญ่จะเกิดการแตกหักและมีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤต สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือ พันธะการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อพื้นต้องมีค่าสูงเพียงพอเพื่อลดการหลุดออกของเส้นใย (Fiber Pull-Out) ให้น้อยที่สุด แท้จริงแล้วความแข็งแรงของพันธะเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกเนื้อพื้น-เส้นใยคู่ใดมาผสมกัน ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุผสมก็ขึ้นอย่างมากกับขนาดของการยึดเหนี่ยวนี้ พันธะยึดเหนี่ยวที่ดีเพียงพอต้องสามารถให้กับการถ่ายเทความเค้นจากเนื้อพื้นที่อ่อนแอไปสู่เส้นใยที่แข็งแกร่งได้มากที่สุด

วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer-Matrix Composites: PMCs) ประกอบด้วยเรซิ่นพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้นและเส้นใยเป็นตัวเสริมแรงวัสดุเหล่านี้ถูกใช้อย่างเป็นกว้างขวางมากที่สุดในงานด้านวัสดุผสมและใช้ในปริมาณมากที่สุดอีกด้วย เพราะมีคุณสมบัติที่อุณหภูมิห้องดี ง่ายต่อการผลิตและราคาถูก

เทคโนโลยีสมัยใหม่มากมายต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่างอยู่รวมกัน ซึ่งไม่สามารถพบในวัสดุทั่วๆ ไปทั้งในโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ วัสดุดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้งานด้านอากาศยานใต้ท้องทะเลมหาสมุทร ใต้น้ำแล้วใช้ในด้านการขนส่ง เช่น วิศวกรการบินเสาะแสวงหาวัสดุสำหรับงานโครงสร้างที่มีคุณสมบัติด้านความหนาแน่นต่ำแข็งแรงและแกร่งทนทานต่อ

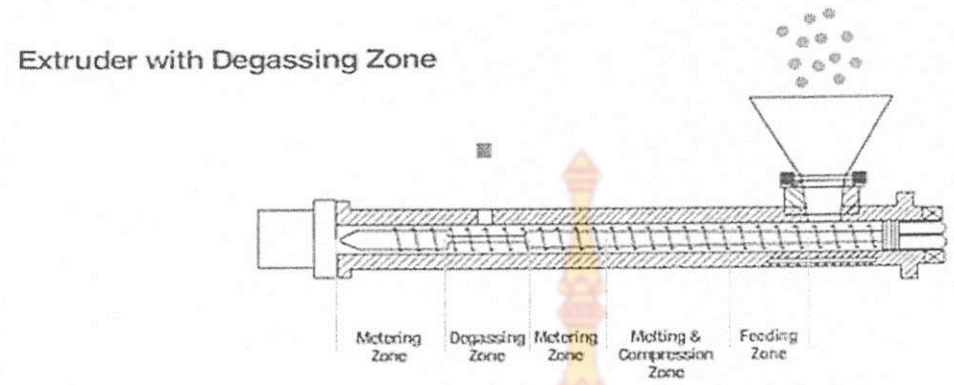
การเสียดสีและการกระแทก และต้องไม่ผุกร่อนได้ง่ายนัก คุณลักษณะทุกอย่างรวมกันเหล่านี้หาพบได้ยากเพราะวัสดุแข็งแรงมักจะมีความหนาแน่นสูง การเพิ่มความแข็งแรงหรือความแกร่งแบบยืดหยุ่นส่งผลให้ต้านทานต่อการกระแทกลดลง การพัฒนาด้านวัสดุผสมทำให้เกิดความหลากหลายในการรวมสมบัติวัสดุเข้าด้วยกันมากขึ้น อาจอธิบายอย่างง่ายได้ว่าวัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีหลายเฟส โดยแต่ละเฟสที่นำมาประกอบจะแสดงสมบัติที่สำคัญของมันเองเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีมากขึ้นกว่าเดิม ดังนั้น จากหลักการผสมเหล่านี้ทำให้สามารถรวมสมบัติต่างๆ ที่ดีเข้าด้วยกันโดยการนำวัสดุที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมารวมกันและส่งผลให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติหลากหลายมาก วัสดุผสมประกอบขึ้นจากเฟส 2 ชนิด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบเฟสที่สองไว้ เฟสที่สองจะถูกเรียกว่า เฟสที่กระจาย (Dispersed Phase) หรือตัวเสริมแรง(Rreinforcement) คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกับคุณสมบัติของสารตั้งต้น ปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว คำว่า “รูปทรงทาเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว” หมายถึง รูปทรงและขนาดของอนุภาค (Shaepe and Size) การกระจายตัว (Distribution) และการเรียงตัว (Orientation) ลักษณะต่างๆ

วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composites) จะแบ่งเป็นกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม คือ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่หรือเม็ดผง และวัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็กละเอียด การจำแนกความแตกต่างระหว่าง 2 กลุ่มนี้ต้องอาศัยกลไกการเพิ่มความแข็งแรง (Strengthening Mechanism) หรือกลไกการเสริมแรง (Reinforcement Mechanism)

2.2.4 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์

กรรมวิธีการขึ้นรูปพอลิเมอร์นั้นมีมากมายหลายวิธี การเลือกใช้กรรมวิธีใดขึ้นกับธรรมชาติของพอลิเมอร์ว่าเป็นเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตติ้ง วิธีการผลิตเทอร์โมพลาสติกนั้นมีหลายวิธี โดยมากจะอาศัยความร้อนทำให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะอ่อนตัวหรือหลอมเหลวจึงทำการขึ้นรูป อีลาสโตเมอร์ก็มีวิธีที่คล้ายๆ กันส่วนทอร์โมเซตติ้งนั้นมีวิธีการขึ้นรูปไม่หลากหลายนัก ทั้งนี้เพราะข้อจำกัดเรื่องกระบวนการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ที่จะเกิดขึ้นได้เพียงครั้งเดียว

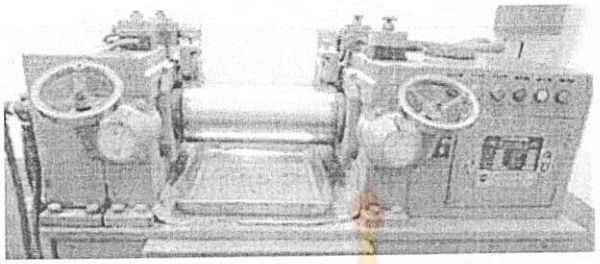
การขึ้นรูปโดยการอัดรีด(Extrusion)เป็นการขึ้นรูปโดยการอัดรีด อาศัยแรงดันจาก สกูรดันพลาสติกที่มีสภาพหลอมเหลวผ่านแม่พิมพ์โลหะ จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความยาวต่อเนื่อง นิยมใช้ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีภาคตัดแบบคงที่ ไม่ว่าจะเป็นรูปทรงเหลี่ยม กลม ท่อ เส้นใย หรือเป็นแผ่นก็ได้ วิธีการนี้จะขึ้นรูปได้รวดเร็วและปริมาณมาก บางครั้งสามารถสร้างเทคนิคพิเศษเพื่อผลิตพลาสติกต่างชนิดกันมากกว่า 2 ชนิดที่มีสีสันต่างกันไปพร้อมกันได้ เครื่องอัดรีดแบบต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เครื่องอัดรีดหรือแบบต่อเนื่อง (Extruder Machine) [9]

การคอมพาวด์เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับพลาสติก โดยพลาสติกจะถูกให้ ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอม จากนั้นสารเติมแต่งและพลาสติกหลอมจะถูกนวดผสมให้เป็นเนื้อ เดียวกัน เทคนิคการคอมพาวด์พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็นการคอมพาวด์แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Compounding) และการคอมพาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous Compounding)

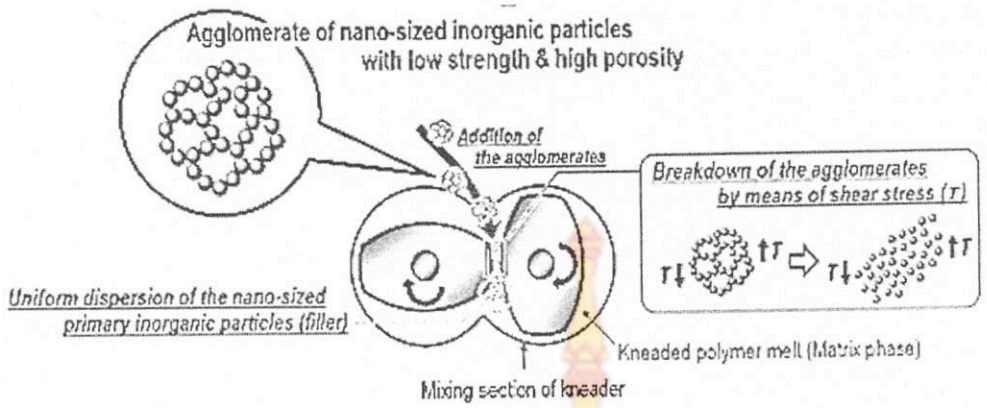
การคอมพาวด์แบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบชุด (Batch Compounding) ตัวอย่างเช่น เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill Mixer) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูกซึ่งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่นในขณะที่ทำการผสมจะมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกผ่านผิวลูกกลิ้งทั้งสอง โดยความร้อนของลูกกลิ้งมาจากชุดให้ความร้อนไฟฟ้าหรือการไหลเวียนของน้ำร้อนหรือน้ำมันร้อนผ่านภายในลูกกลิ้ง ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือสามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของ สารเติมแต่งและพลาสติกได้ สามารถทำการผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้ สะดวกในการทำความสะอาด รวมทั้งการผสมแบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะแผ่นซึ่งเหมาะสำหรับการแปรรูปต่อ โดยบางเทคนิค เช่น การอัด (Compression Molding) สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ผู้ปฏิบัติต้องมีทักษะในการใช้เครื่องและมีความรู้เกี่ยวกับการคอมปาวด์สูง ต้องมีการช่วยผสมโดย การปาดพลาสติกให้เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างลูกกลิ้งเสมอ ความสม่ำเสมอในการผสมแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำ และเกิดการสูญเสียสารเคมีหรือการปนเปื้อนได้ง่าย เนื่องจากเป็นการผสมในระบบเปิดแสดง



รูปที่ 2.3 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill Mixer) [9]

เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้ง จำนวนสองชุดบรรจุอยู่ภายในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหล หมุนเวียนโรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก จึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือใช้เวลาในการผสมสั้น ผู้ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ทำให้อัตราส่วนในการผสมความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือไม่สามารถมองเห็นการผสมได้และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก และการผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมโดยกระบวนการพอลิเมอร์คอมพาวด์[10]

รูปที่ 2.4 เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer)



รูปที่ 2.5 แสดงการผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมโดยกระบวนการพอลิเมอร์คอมพาวด์ [7]

2.2.5 การนำความร้อน

การนำความร้อนคือปรากฏการณ์ที่ความร้อนถ่ายเทจากเนื้อวัสดุจากบริเวณที่มีความร้อนสูงสู่บริเวณที่อุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุคือ ค่าการนำความร้อน(Thermal conductivity) นิยามในรูปสมการ

$$q = -k\frac{dT}{dx} \qquad \text{(สมการที่ 1)}$$

ซึ่ง q คือฟลักซ์ความร้อน (Heat flux)หรือความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาต่อพื้นที่ (พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล) k คือค่าความนำความร้อน และ $\frac{dT}{dx}$ คือการกระจายหรือความแตกต่างอุณหภูมิตลอดตัวกลางที่นำความร้อน หน่วยของ q และ k คือ W/m^2 และ W/m-K ตามลำดับ

โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมากเพราะมีอิเลคตรอนอิสระจำนวนมากทำให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ค่าความนำความร้อนของโลหะมีค่าระหว่าง 20-400 W/m-K เซรามิกมีสมบัติเป็นฉนวนเพราะขาดอิเล็กตรอนอิสระแต่โฟนอนจะทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนแต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่าอิเลคตรอนอิสระ ค่าความนำความร้อนสำหรับวัสดุเซรามิกจะอยู่ระหว่าง 2-150 W/m-K สำหรับวัสดุประเภทพอลิเมอร์การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการสั่นและการหมุนโซ่โมเลกุล ขนาดของค่าความนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณความเป็นผลึก ซึ่งค่าความนำความร้อนของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ประมาณ 0.3 W/m-K คุณสมบัติเชิงความร้อนสำหรับวัสดุต่างๆ รวบรวมอยู่ในตารางที่ 1

เมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้วัสดุเกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนส่งผลให้เกิดการความเสียและเกิดการเสียรูปอย่างถาวร [11]

ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติเชิงความร้อนสำหรับวัสดุต่างๆ [12]

ชนิดวัสดุ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ(Specific heat capacity:C_p) (J/Kg-K)	ค่าความนำความร้อน (Thermal conductivity: λ) (W/m-K)
อะลูมิเนียม	900	247
ทองแดง	386	398
เงิน	235	428
อะลูมินา	775	39
อะลูมิเนียม ไนไตรด์	740	150
โบรอนไนไตรด์	800	65
ซิลิกา	840	1.7
พอลิเอททิลีน	1,850	0.12
พอลิโพรพิลีน	1,925	0.13
ไนลอน 6,6	1,670	0.24

2.2.6 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ (Polymer Rheology)

รีโอโลจี (Rheology) เป็นการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เหลว โดยเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และเวลา (Time) โดยมีจุดประสงค์ของการศึกษารีโอโลจี คือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวิเคราห์การไหลของพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการผลิต โดยเชื่อมโยงความสัมพันธระหว่างโครงสร้างโมเลกุลพอลิเมอร์กับพฤติกรรมการและสามารถออกแบบกระบวนการผลิตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติสอดคล้องตามความต้องการ

พฤติกรรมการไหลของของเหลว (Viscous Flow) นิยามในรูปสมการ

$$Viscosity\ (\eta) = \frac{Shear\ Stress}{Shear\ Rate} = \frac{\tau}{\dot{\Upsilon}} \qquad \text{(สมการที่ 2)}$$

ซึ่งความหนืด (Viscosity) เป็นตัวแปรสำคัญของการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของเหลว คือ อัตรา ส่วนของความเค้นเฉือน (Shear Stress) กับอัตราเฉือน (Shear Rate)

ลักษณะการไหลของของเหลวสามารถแบ่งได้2 แบบ คือ

1) ของเหลวนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามกฎของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลจะมีควาความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนคงที่เป็นเส้นตรง ตัวอย่างของเหลวชนิดนี้ เช่น ก๊าซ น้ำ ของเหลวไฮโดรคาร์บอน และตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น

2) ของเหลวไม่เป็นนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) เป็นลักษณะของไหลที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้จะมีสมบัติไม่เหมือนกับของไหลนิวโตเนียน กล่าวคือ shear viscosity จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราเครียดเฉือน(shear rate) โดยจะแบ่งของไหลในกลุ่มนี้ออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก 3 กลุ่ม คือ

- ของเหลวไดลาเทนท์ (Dilatant Fluid) เป็นของเหลวที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear Thickening” ตัวอย่างเช่น น้ำดินข้น น้ำแป้ง น้ำผึ้ง พลาสติไซเซอร์ เป็นต้น
- ของเหลวซูโดพลาสติก (Pseudoplastic Fluid) ของเหลวชนิดนี้มีความหนืดลดลง เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่อัตราเฉือนสูง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ ผ่านกันง่ายขึ้น เป็นสาเหตุให้ความหนืดลดลง เมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้น พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear Thinning” ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์เหลว ยาง เลือด สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ทั้งที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ เป็นต้น
- ของเหลวบิงแฮม (Bingham Fluid) ของเหลวชนิดนี้จะไม่เสียสภาพจนถึงค่าความเค้นวิกฤต (Critical Shear Stress หรือ Yield Point) หลังจากนั้นของเหลวอาจแสดงพฤติกรรมแบบนิวโตเนียนหรือไม่เป็นนิวโตเนียนก็ได้ เช่น น้ำโคลน จาระบี ยาสีฟัน เป็นต้น [11-13]

2.2.6 สมบัติเชิงกล [12]

สมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) และอื่นๆ อีก ฯลฯ เป็นสิ่งที่บอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถรับภาระหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเราพิจารณาเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่นำมาพิจารณาคือสมบัติเชิงกลของวัสดุ การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักรหรืออุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของวัสดุรวมทั้งการทดสอบสมบัติเชิงกลที่สำคัญบางประเภท เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาขั้นต่อไป

ความเค้น (Stress)

ความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{2.1}$$

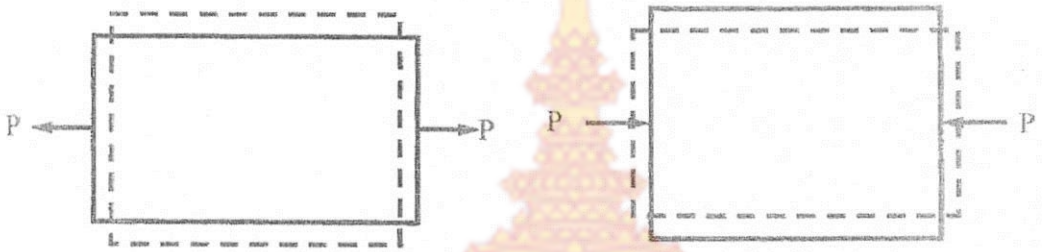
เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น ปาสคาล (Pa, 1 Pa = $1N/m^2$) หรือ kgf/mm^2 หรือ psi (lbf/in^2)

P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็น m^2 หรือ mm^2 หรือ in^2

โดยทั่วไป ความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.1 a)



a) แรงดึง (Tension) b) แรงกด (Compression)

c) แรงเฉือน (Shear)

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังแสดงในภาพที่ 2.1 b)

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังภาพที่ 2.1 c) ค่าความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง 3 ชนิดนี้พร้อมๆ กัน

ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอะตอมภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนรูปสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำออก อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ หรือมีขนาดเท่าเดิม ตัวอย่าง เช่น วัสดุพวกยางยืด และสปริงเป็นต้น

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงที่กระทำกับวัสดุออกแล้ว แต่วัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไป โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่สามารถกลับไปตำแหน่งเดิมได้

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นที่เกิดขึ้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูป วัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ประเภทนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งที่พบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก ที่เรียกว่า “ความเครียดกึ่งอิลาสติก” ซึ่งวัสดุเมื่อปลดแรงกระทำออกวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปมีลักษณะเหมือนเดิม

การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

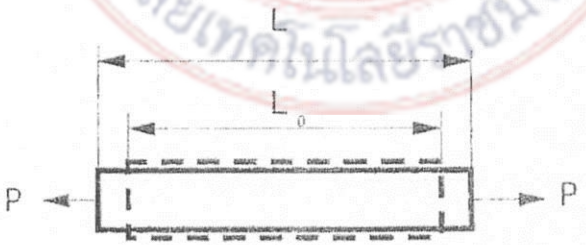
1. แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้เรียกว่า “ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)” จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \qquad (2.2)$$

เมื่อ ε = ความเครียดเชิงเส้น

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L - L_o$)

L_o = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length



รูปที่ 2.7 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)

2. แบบเฉือน ความเครียดที่วัดได้เรียกว่า “ความเครียดเฉือน (Shear Strain)” ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน (τ) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

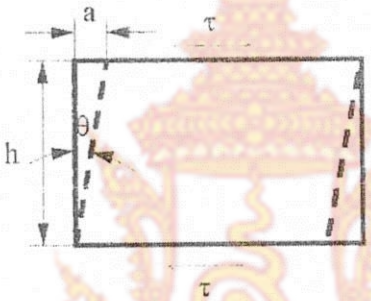
$$\gamma = \frac{a}{h} \tag{2.3}$$

เมื่อ $\gamma = \tan\theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)

a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)

h = ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ = มุมที่เปลี่ยนไป

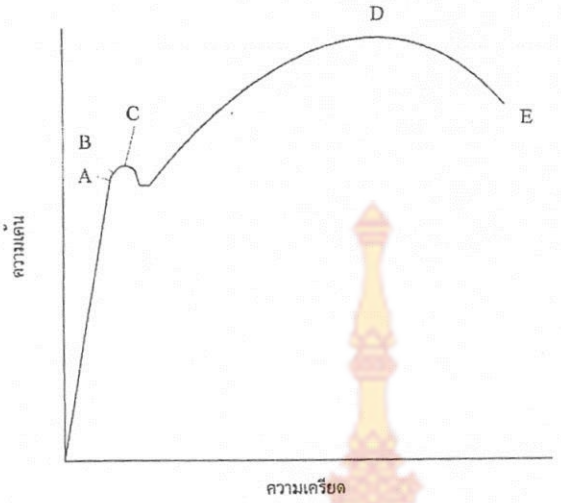


รูปที่ 2.8 ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

จากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าค่าของความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

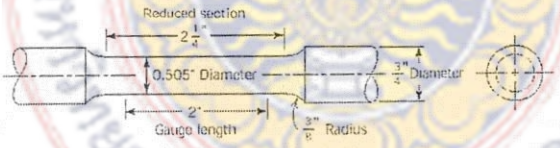
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในที่นี้เราจะใช้กราฟเส้นโค้ง ความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังแสดงในภาพที่ 2.4 การทดสอบแรงดึงนอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะและความเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



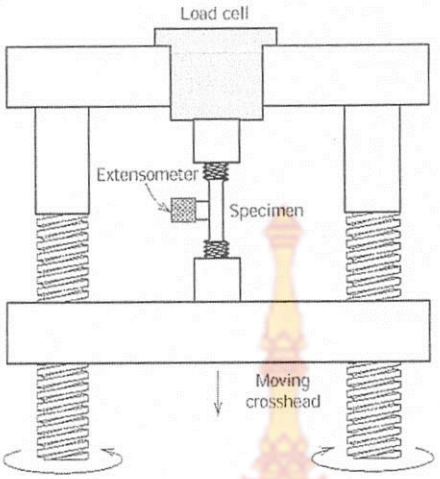
รูปที่ 2.9 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด(Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

วิธีการทดสอบนั้นจะนำตัวอย่างชิ้นทดสอบมาทำการดึงทดสอบอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 หลังจากนั้นนำค่าความเค้นและความเครียดมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังภาพที่ 2.4 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานต่างๆ ของการทดสอบ ตัวอย่างของชิ้นทดสอบ และมาตรฐานของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย



a) ลักษณะของชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง



b) ลักษณะการทดสอบแรงดึง

รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบและวิธีการทดสอบความต้านแรงดึง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 วิธีการดำเนินการทดลอง

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วยกิจกรรมต่างๆ แสดงรายละเอียดดังนี้ซึ่งแผนผังแสดงขั้นตอนและกิจกรรมดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1

กิจกรรมที่ 1 การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลอง

ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยการเติมที่มีขนาดที่ต่างกัน เพื่อการเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยและช่วยในการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัยตัวแปรที่สำคัญ

กิจกรรมที่ 2 จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

จัดหาวัสดุที่ใช้ในการทดลองและจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

กิจกรรมที่ 3 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ ด้วยการทำคอมปาวด์โดยการหลอมผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยควบคุมความเร็วสกรู 50, 100, 150 รอบ/นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 200 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนของสารเสริมแรงที่ทำการศึกษาได้แสดงที่ตารางที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

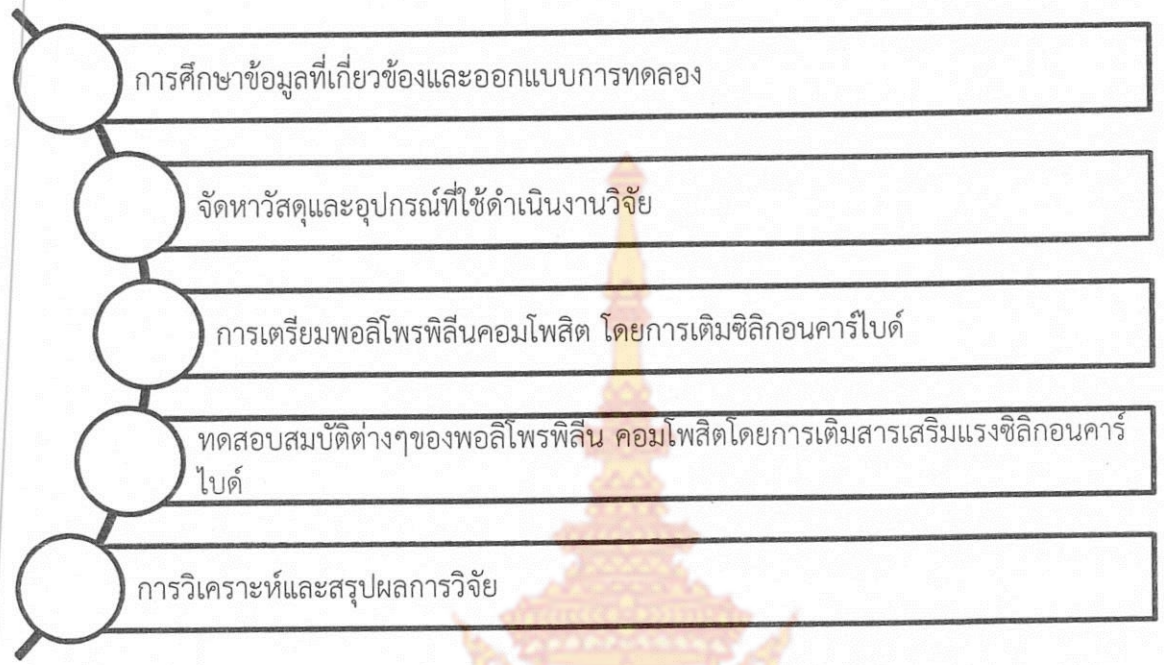
กิจกรรมที่ 4 ทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิโพรพิลีน์คอมโพสิตโดยการเติมสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์

ทำการเตรียมตัวอย่างพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อนำไปทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้ ทดสอบสมบัติทางความร้อน ทดสอบสมบัติทางกล เป็นต้น

ศึกษาหาความเชื่อมโยงระหว่างการจัดเรียงตัวกับสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยเปรียบเทียบของขนาดของสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ ด้วยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กิจกรรมที่ 5 การวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต จากการทดลองสมบัติการนำความร้อน สมบัติทางความร้อน เพื่อนำมารวบรวมสรุปผลการศึกษาวิจัย เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ และเผยแพร่งานวิจัยต่อไป



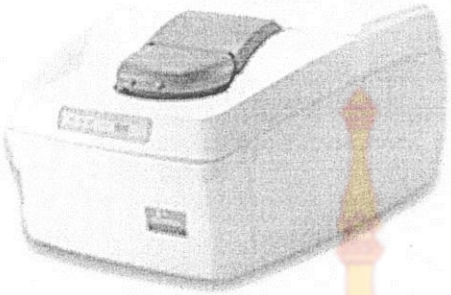
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนและกิจกรรมการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุอุปกรณ์

- พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โครงสร้างเป็นโคพอลิเมอร์ มีอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow index) 12 g/10 min ความหนาแน่น (Density) 0.9 g/cm^3
- ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) ขนาดอนุภาค 11.99± 8.3 ไมครอนซึ่งได้จากกระบวนการพ่นทราย และ ขนาดอนุภาค ~400 เมช หรือ ประมาณ 43 ไมครอน

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลลอรีเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC) ของ Seiko Instruments โดยชั่งตัวอย่างในแพนอะลูมิเนียมจากนั้นอัดปิดฝาและดำเนินการตามวิธีการดังนี้ คือทำการทดสอบโดยเริ่มให้ความร้อนจาก 25 ถึง 200°C ที่อัตรา 10 °C/min (First heating) จากนั้นทำให้เย็นตัวจาก 200 ถึง -40°C ที่อัตรา 10 °C/นาที (Cooling) และให้ความร้อนจาก -40 ถึง 200° ที่อัตรา 10 °C/นาที (Second heating) ในระบบเอนโดเทอมิคบันทึกการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อน

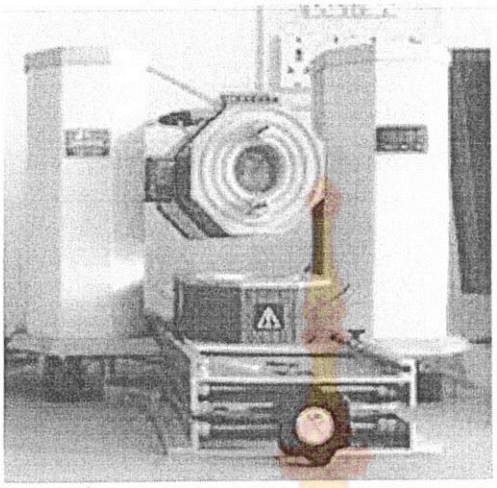


รูปที่ 3.2 ดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลลอรีเมทรี รุ่น Perkin Elmer DSC8500 (http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php?page=eqp)

ทดสอบสมบัติการนำความร้อนด้วยเครื่อง Thermal constant analyser (TPS2500S) ของ Hot disk จากประเทศสวีเดน ตัวอย่างทดสอบเป็นแผ่นฟิล์มที่ผ่านการอัดด้วยความร้อน การทดลองนี้ตั้งสมมติฐานว่าการจัดเรียงตัวสารเสริมแรงเป็นแบบสุ่ม

รูปที่ 3.3 เครื่อง Thermal constant analyser (TPS2500S) ของ Hot disk (ที่มา http://www.hotdiskinstruments.com/products/instruments-for-thermal-conductivity-measurements/tps-2500-s.html)

ทดสอบสมบัติทางกล (Dynamic mechanical analysis, DMA) รุ่น DMA800 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ทดสอบตัวอย่างที่ 25 ถึง 500 °C ตัวอย่างทดสอบเป็นแผ่นฟิล์มที่ผ่านการอัดด้วยความร้อน การทดลองนี้ตั้งสมมติฐานว่าการจัดเรียงตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นแบบสุ่ม

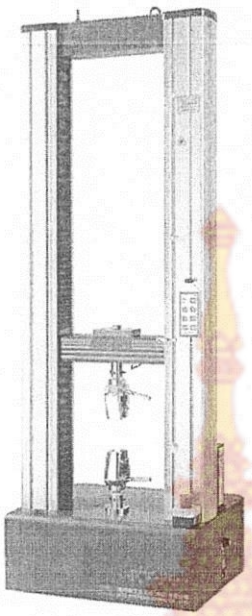


รูปที่ 3.4 สมบัติทางกล รุ่น DMA800
(ที่มา http://www.iitr.ernet.in/departments/MT/pages/Polymer_Laboratory.html)

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเลคตรอนไมโครสโคป(Scanning electron microscopy, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ

รูปที่ 3.5 สแกนนิ่งอิเลคตรอนไมโครสโคป รุ่น FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)
(http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php?page=eqp)

ทดสอบสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดึงทำการทดสอบโดยการใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine โดยทำการวัดที่อุณหูมิห้อง และทำการเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM 638 โดยกำหนดอัตราเร็วในการดึง 2 mm/min



รูปที่ 3.6 ทดสอบสมบัติทางกล
(ที่มา http://www.cjcengineering.com/product-detail.php?id=40719)

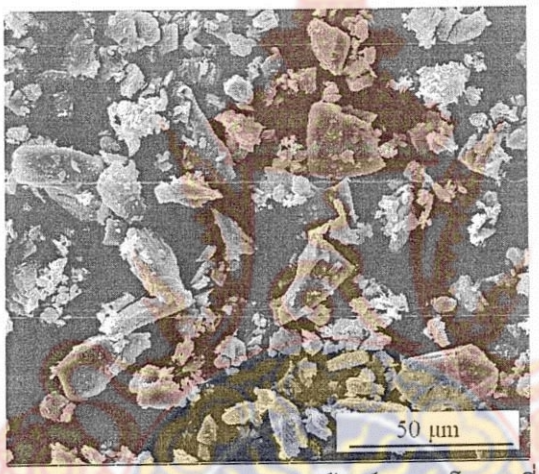
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทที่ 4
ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์

4.1.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำคอมปาวด์โดยการหลอมผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องผสมแบบไม่ต่อเนื่อง

โดยทำการศึกษาซิลิกอนคาร์ไบด์ 2 ชนิด ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน คือ ขนาดอนุภาค 11.99± 8.3 ไมครอนซึ่งได้จากกระบวนการพ่นทราย (SiC-S) และ ขนาดอนุภาค ~400 เมช หรือประมาณ 43 ไมครอน (SiC-L)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาดโดยเฉลี่ย 11 ไมครอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ตารางที่ 4.1 ระบบการทดลองของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์ คอมโพสิต ที่อัตราเร็วของสกูรแตกต่างกัน

ระบบการทดลอง	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน (wt%)	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโบรอนไนไตรด์ (wt%)	อัตราเร็วของสกูร (รอบ/นาที, rpm)	หมายเหตุ
Neat PP_50	100	0	50	
PP/10wt%SiC-S_50	90	10	50	
PP/30wt%SiC-S__50	70	30	50	
PP/30wt%SiC-S__100	70	30	100	
PP/30wt%SiC-S__150	70	30	150	
PP/40wt%SiC-S _50	60	40	50	
PP/5wt%SiC-L_50	95	5	50	
PP/10wt%SiC-L_50	90	10	50	
PP/20wt%SiC-L_50	80	20	50	
PP/30wt%SiC-L_50	70	30	50	

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางคาวามร้อนของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิตด้วยเทคนิคเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลลอรีเมทรี (DSC)

อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting, ΔH_m) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของพอลิโพรพิลีน อยู่ที่ 168 °C และ ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting, ΔH_m) อยู่ที่ 78.87 J/g เมื่อเติมสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วน 10, 30, และ 40 wt% พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลง รวมทั้งค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวลดลง นอกจากนี้อัตราเร็วของสกูรที่ในกระบวนการผสมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหลอมเหลวและค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว จากลักษณะเป็นเนื้อผสมที่ไม่เข้ากัน (Heterogeneous Mixture) ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างพื้นผิวของสารเสริมแรงเซรามิกส์และเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตลดลง เหตุเพราะพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว โดยที่อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาด 47 ไมครอน มีอุณหภูมิหลอมเหลวและค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวสูงกว่าอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาด 11.99± 8.3 ไมครอน ดังแสดงในรปที่ 4.2

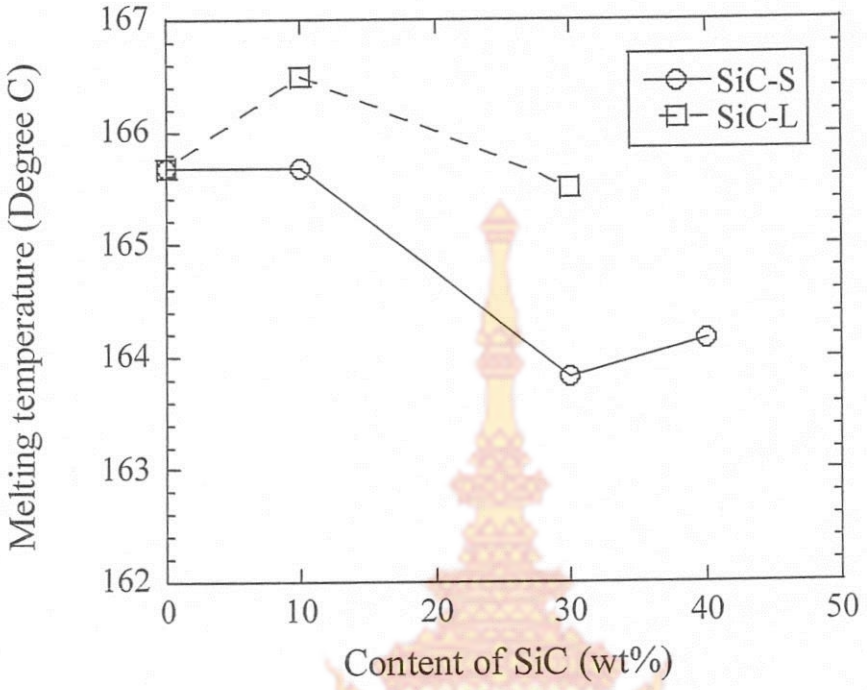
$$X_c(\%)=\frac{\Delta H_m/\phi_{PP}}{\Delta H_m^0}\times 100 \qquad (4\text{-}1)$$

where $\triangle H_m^0$ is the melting enthalpy of PP crystal (208 J/g) [16] and ϕ_{PP} is PP content in the composite.

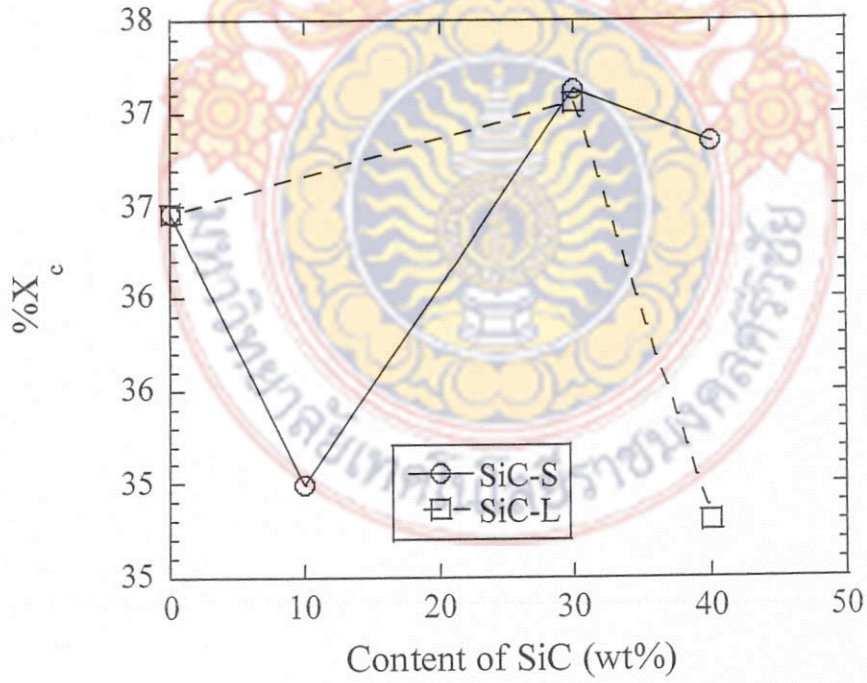
จากการคำนวณหาค่าปริมาณความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต พบว่า เมื่อเติมสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ มีผลต่อปริมาณการเกิดผลึกในพอลิโพรพิลีน อันเนื่องมาจากสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์เปรียบเสมือนสิ่งเจือปนทำให้พอลิโพรพิลีนสามารถก่อผลึกได้เร็วกว่า พอลิโพรพิลีน ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์

Sample	SiC (wt%)	Screw speed (rpm)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	$\%X_c$ [7]
Neat PP_50	0	50	165.67	76.87	36.96
PP/10wt%SiC-S_50	10	50	165.67	66.44	35.49
PP/30wt%SiC-S__50	30	50	163.83	54.78	37.63
PP/30wt%SiC-S__100	30	100	164.50	52.79	36.25
PP/30wt%SiC-S__150	30	150	163.67	53.72	36.90
PP/40wt%SiC-S _50	40	50	164.17	46.61	37.35
PP/10wt%SiC-L_50	10	50	166.50	70.31	37.56
PP/30wt%SiC-L_50	30	50	165.50	51.40	35.30

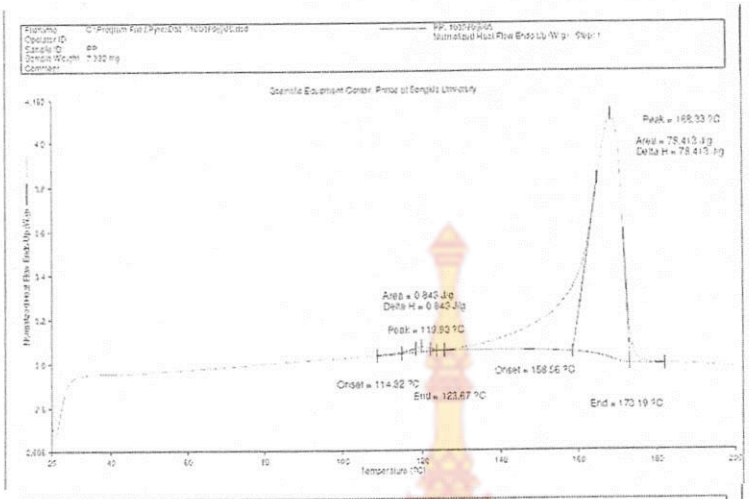


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต โดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ 2 ชนิด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

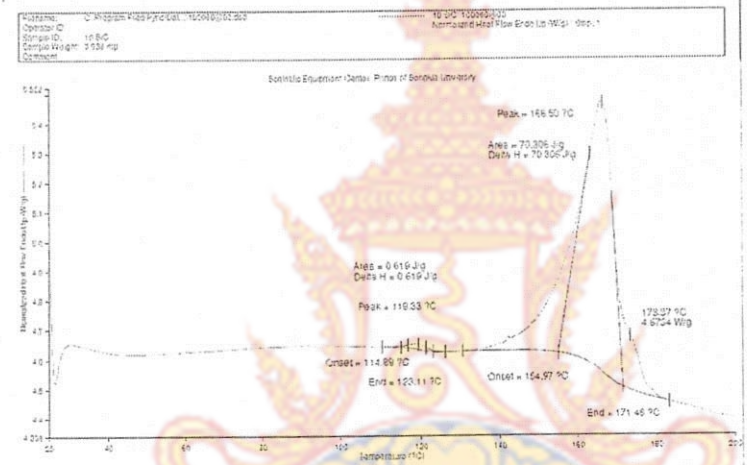


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงปริมาณการเกิดผลึก (%Crystallinity) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต โดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ 2 ชนิด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

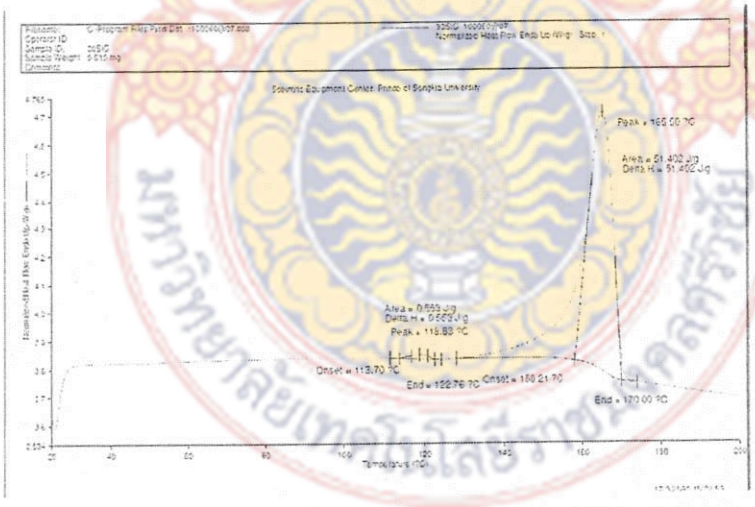
(ก)



(ข)



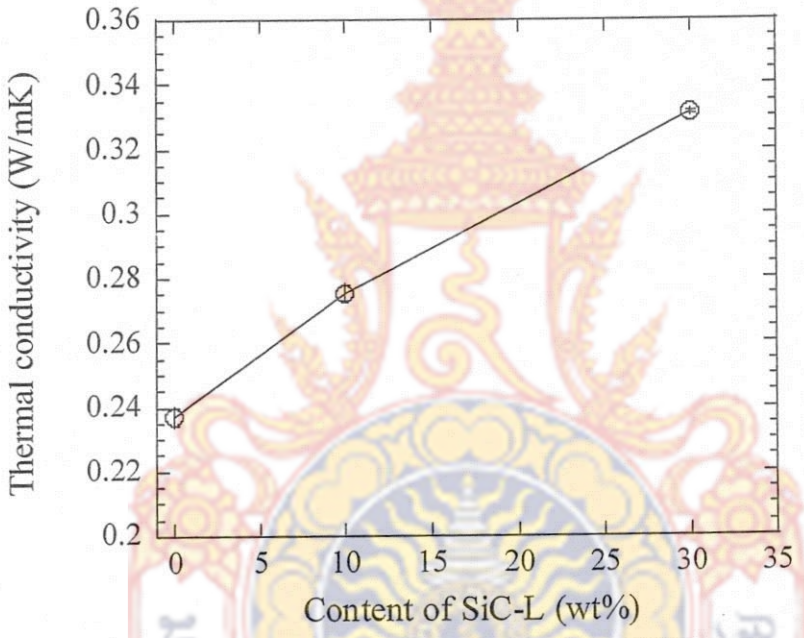
(ค)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting, ΔH_m) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC โดยคำนวณจากพื้นที่ใต้โค้ง พอลิโพรพิลีน (ข) พอลิโพรพิลีน/10%wt ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต (ค) พอลิโพรพิลีน/30%wt ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต

4.3 ผลการทดลองสมบัติการนำความร้อน

จากรูปที่ 4.5 แสดงสมบัติการนำความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาดอนุภาค 43 ไมครอน ที่ปริมาณ 0 10 และ 30 wt% จากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) พอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิตมีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นแปรผันกับปริมาณของสารเสริมแรง วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนมากที่สุด คือ พอลิโพรพิลีน/30 wt% ซิลิกอนคาร์ไบด์ คอมโพสิต เท่ากับ 0.33 W/mK (อัตราการเพิ่มขึ้น 39.66 % จากพอลิโพรพิลีน)

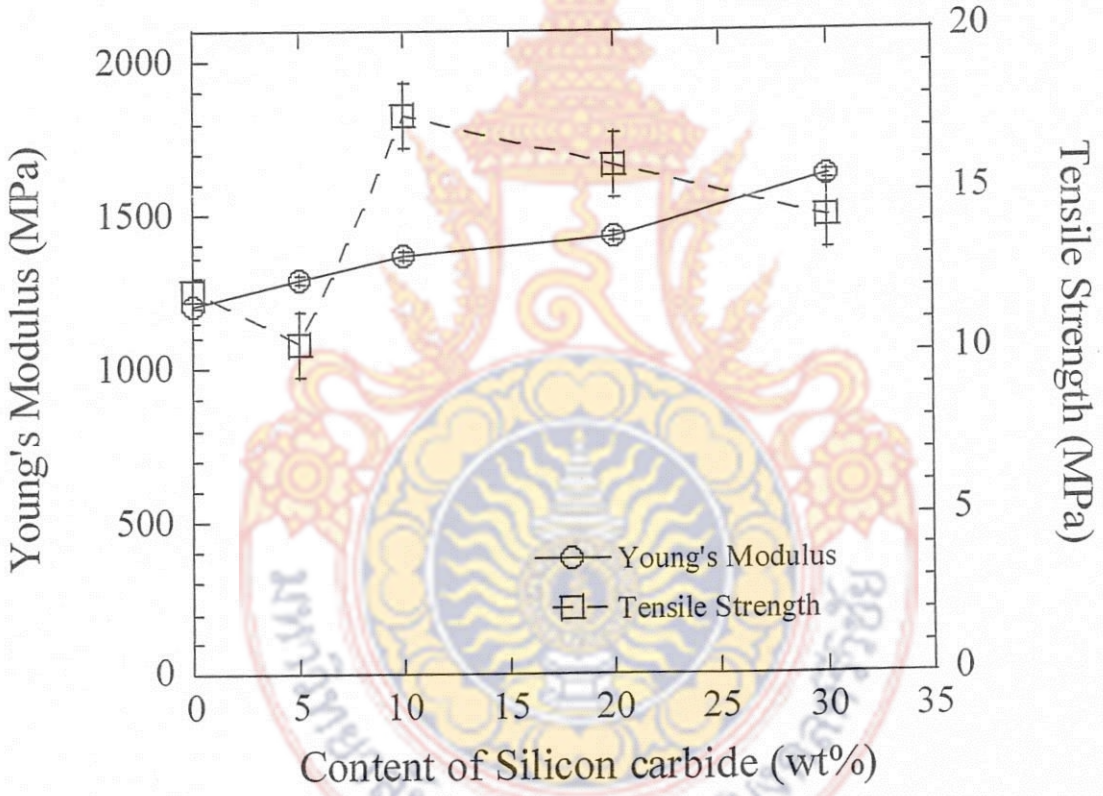


รูปที่ 4.5 ค่าการนำความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต

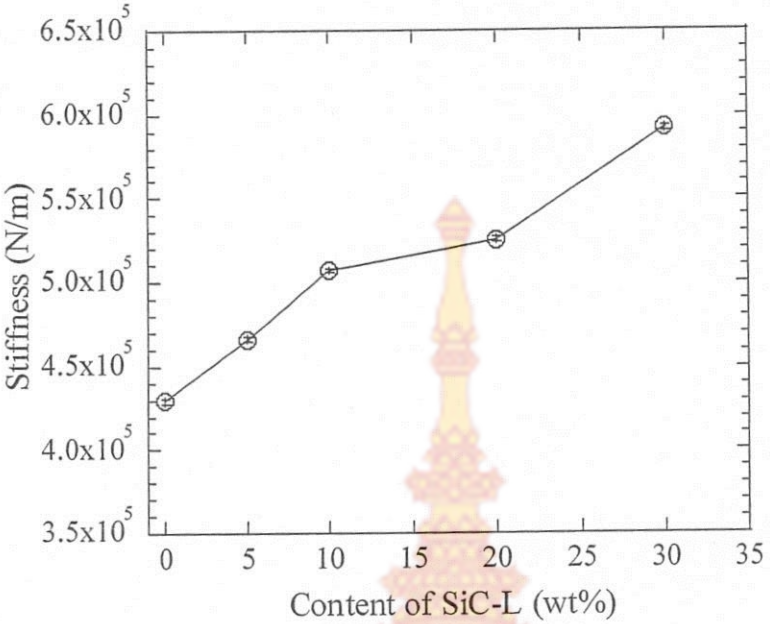
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

4.4.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงผลการการทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยเติมสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) พบว่าเมื่อปริมาณสารเสริมแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มอดูลัสของยังและความแข็งแรงดึงของวัสดุเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองมอดูลัสของยังมากที่สุด คือ 30wt% ของซิลิกอนคาร์ไบด์ (1628.3 MPa, อัตราการเพิ่มขึ้น 34.86% จากพอลิโพรพิลีน) และ ความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 10wt% ของซิลิกอนคาร์ไบด์ (14.23 MPa, อัตราการเพิ่มขึ้น 41.31% จากพอลิโพรพิลีน) และความแข็งแรงดัดมากที่สด คือ 30 wt% ของซิลิกอนคาร์ไบด์ (5.914×10^5 N/m, อัตราการเพิ่มขึ้น 37.86% จากพอลิโพรพิลีน)



รูปที่ 4.6 มอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต

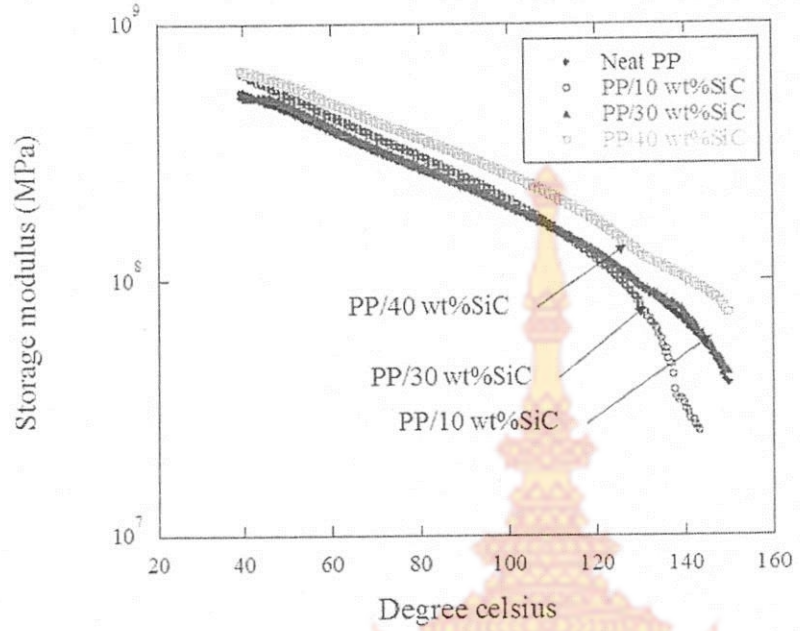


รูปที่ 4.7 ความแข็งแรงดัด (Stiffness) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต

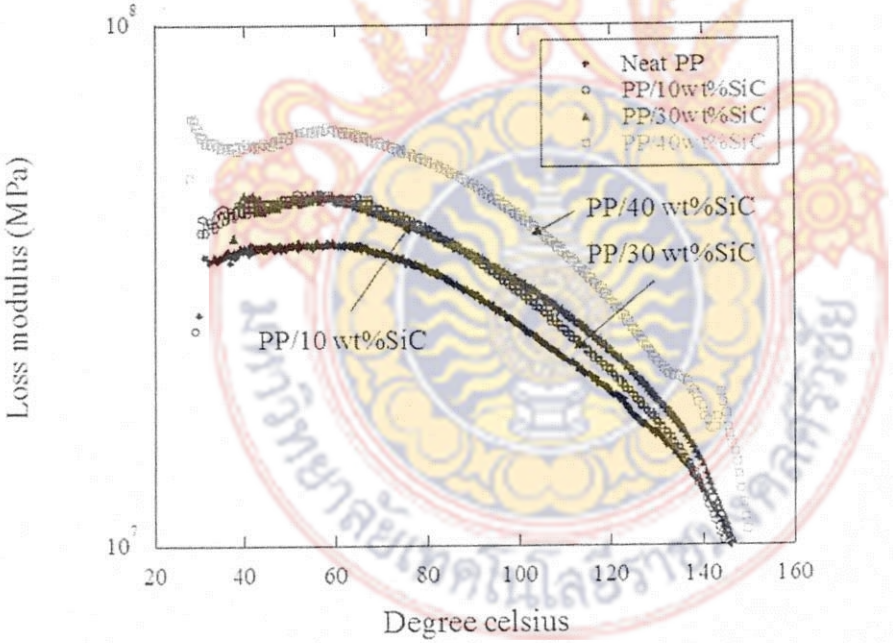
4.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

Dynamic mechanical analysis (DMA) เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติวิสโคอิลาสติกของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันกับ อุณหภูมิ เวลา ความถี่ ความเค้น

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus) โดยแปรผันกับอุณหภูมิ และรูปที่ 4.9 ค่าโมดูลัสการสูญเสีย (Loss modulus) พบว่าปริมาณสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ 40 wt% มีค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสการสูญเสีย สูงที่สุด และรองลงมาคือ ที่ 10 wt% ซิลิกอนคาร์ไบด์ กล่าวได้ว่าการเพิ่มสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุในช่วงอีลาสติก (Elastic) แต่ทั้งนี้ปริมาณของสารเสริมแรงไม่สามารถถึงผลกระทบที่มีต่อค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสการสูญเสีย



รูปที่ 4.8 ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต

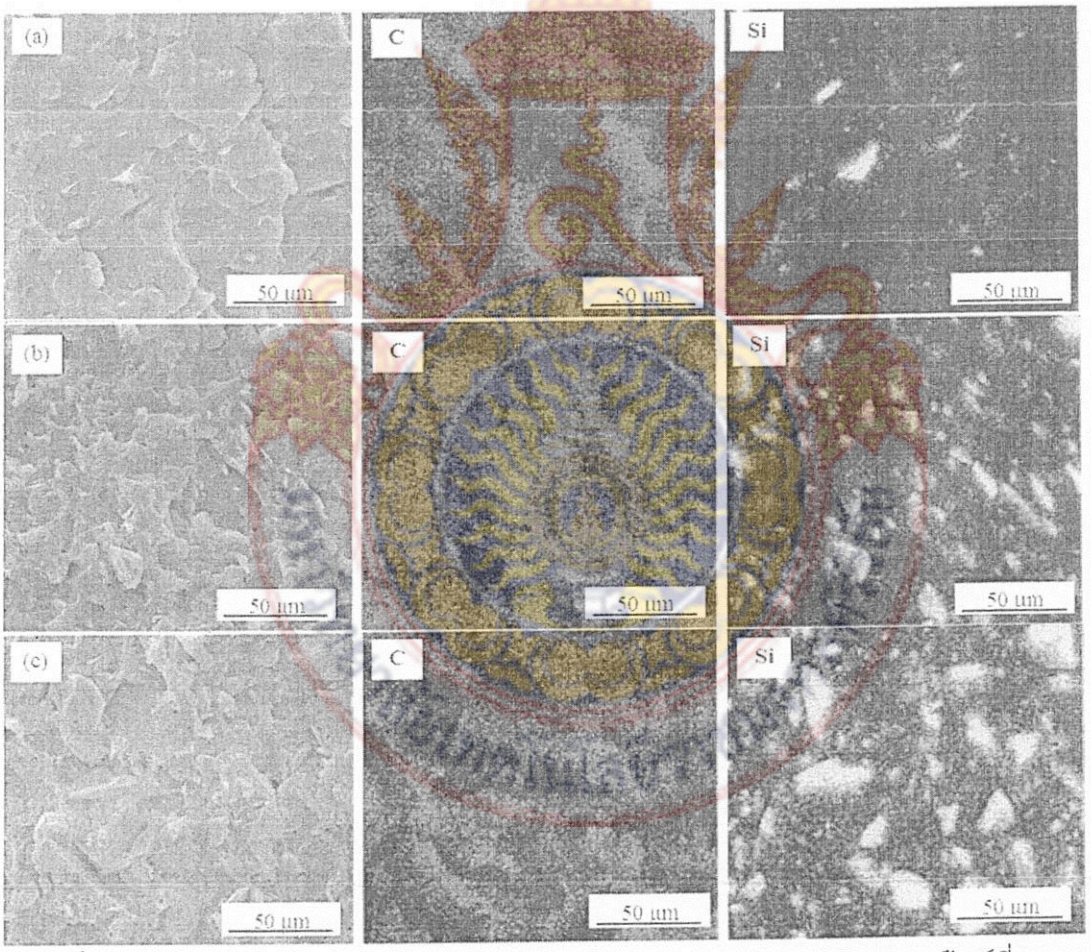


รูปที่ 4.9 ค่าโมดูลัสการสูญเสีย (Loss modulus) ของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต

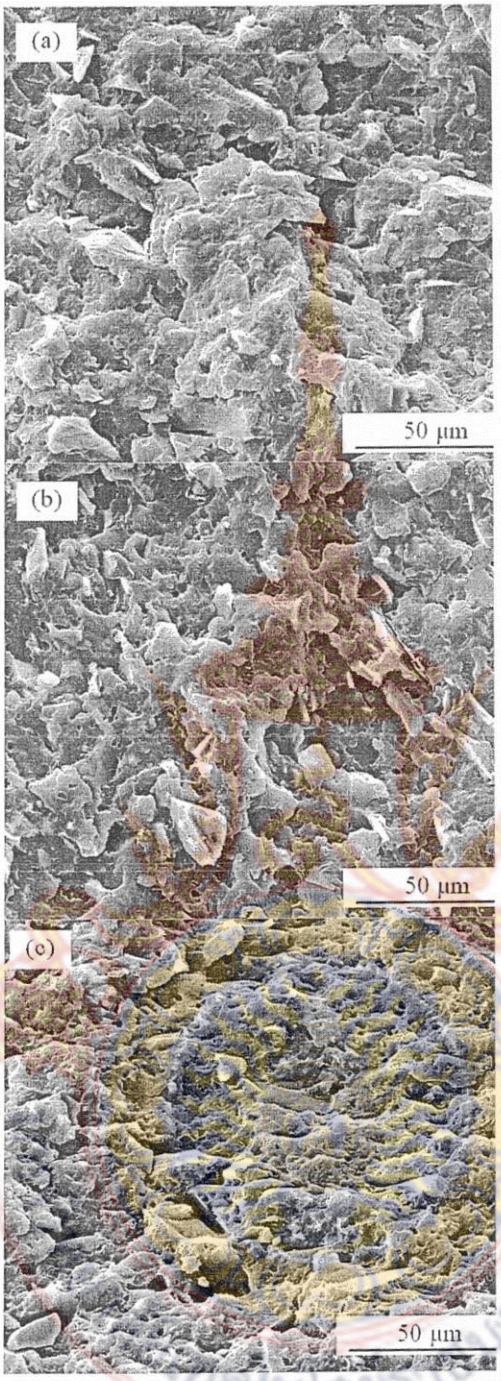
4.5 โครงสร้างอสัญฐานของวัสดุด้วย SEM

จากรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 10, 30 และ 40 wt% ที่มีขนาดอนุภาค 11.99± 8.3 ไมครอน พบว่าเมื่อปริมาณสารเสริมแรงเพิ่มขึ้นระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน แต่ที่อัตราส่วน 40 wt% พบว่าบางบริเวณมีการเกาะกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็กๆ กระจายในเนื้อพื้นพอลิเมอร์

ภาพโครงสร้างอสัณฐานแสดงลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยอัตราเร็วรอบของเครื่องผสมแบบปิด 50, 100, 150 rpm แสดงในรูปที่ 4.11 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่อัตราเร็วรอบสูงมีอนุภาคขนาดเล็ก และเกิดฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อพอลิโพรพิลีน แต่ที่อัตราเร็ว 50 และ 100 rpm อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์กระจายตัวได้ทั่วบริเวณ

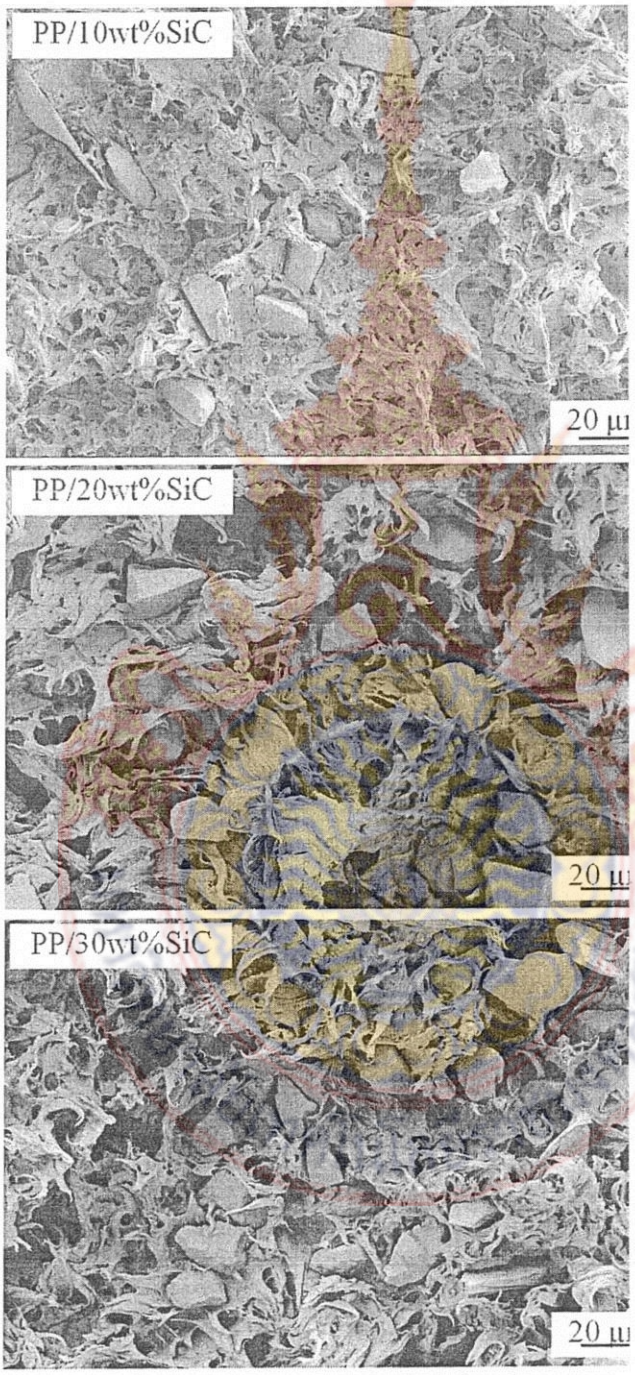


รูปที่ 4.10 โครงสร้างอสัณฐานเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนๆต่างในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน (a) PP/10wt%SiC composites, (b) PP/30wt%SiC compositesและ (c) PP/40wt%SiC composites

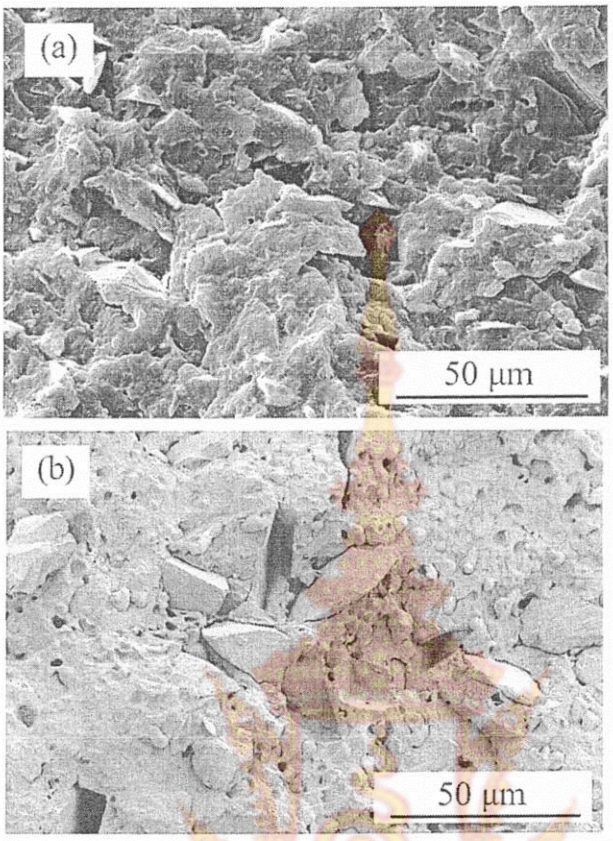


รูปที่ 4.11 โครงสร้างอสัณฐานเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ 30wt% โดยความเร็วของสกูร (a) 50 rpm (b) 100 rpm และ (c) 150 rpm

จากรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาดอนุภาค 43 ไครอน ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 wt% พบว่า พอลิโพรพิลีน/ซิลิกอนคาร์ไบด์คอมโพสิต เมื่อเพิ่มปริมาณสารเสริมแรงส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง และมีการจัดเรียงตัวหนาแน่นขึ้น นอกจากนี้บางบริเวณเกิดการเกาะกลุ่ม (Aggregation) ของอนุภาคในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 4.12 โครงสร้างอสัณฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC)



รูปที่ 4.13 โครงสร้างอสัณฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่อัตราส่วน 30 wt% (a) อนุภาคขนาด 11 ไมครอน (SiC-S) และ (b) อนุภาคขนาด 43 ไมครอน (SiC-L)

จากรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันพบว่า ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีการเกาะกลุ่มกัน และกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยการเติมสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติการนำความร้อนและสมบัติทางกลคือปริมาณและขนาดของสารเสริมแรง รวมทั้งอัตราเร็วของสกูรในกระบวนการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด จากผลการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบค์ลดลง ทำให้เป็นการเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (Thermal conductive pathway) รวมทั้งเป็นเพิ่มความสามารถในการรับแรงของวัสดุในช่วงอีลาสติก แต่การเกิดการเกาะกลุ่ม (Aggregated) ของอนุภาคขนาดเล็กของซิลิกอนคาร์ไบด์มีนัยสำคัญต่อการลดลงของสมบัติเชิงกล ก่อให้เกิดความเครียดสะสมทำให้เกิดการเสียรูปถาวร เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ซิลิกอนคาร์ไบด์มีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพอลิเมอร์และไม่มีการเกาะกลุ่ม แต่ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นแปรผันกับปริมาณ ละความสามารถในการกระจายตัวของสารเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์นั่นเอง

นอกจากนี้ซิลิกอนคาร์ไบด์มีผลต่อการเพิ่มโครงร่างแหโดยการแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic behavior) ดังนั้นการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากหนืดไหล (viscous) เป็นยืดหยุ่น (Elastic) หรือเรียกว่าเกิดการเสริมแรง (Reinforment) ขึ้น โครงร่างแหทางกายภาพที่เกิดขึ้นและให้มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น อาจเกิดการกระจายตัว (Dispersion) ของอนุภาคเสริมแรงสม่ำเสมอทั่วเนื้อเมทริกซ์ หรือเกิดจากการเรียงตัวชิดกันของอนุภาคต่อเนื่องเป็นโครงสร้างร่างแหเมื่อปริมาณอนุภาคสูง หรือเกิดการดูดซับสายโซ่บนอนุภาค ทำให้อนุภาคทำหน้าที่เสมือนจุดเชื่อมขวาง (Crosslinked point) เป็นต้น ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนนั่นเอง และเป็นผลให้อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting, ΔH_m) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน

ข้อเสนอแนะ

ควรจะศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของปัจจัยด้านอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของซิลกอนคาร์ไบด์ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์เพิ่มเติม

บรรณานุกรม

[1] Yu. S., Hing, P., Hu, X., "Thermal conductivity of polystyrene-aluminium nitride composite", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **33**(2),289-292 (2002)

[2] Xu. Y., Chung, D. D. D., Mroz, C., "Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **32**, 1749-1757 (2001)

[3] Jung. J., Kim, J., Uhm, Y. R., Joen, J. K., Lee, S., "Preparations and thermal properties of micro- and nano BN dispersed HDPE composites", *Thermochim. Acta*, **499**(1-2), 8-14(2010)

[4] Shin. Y. K., Lee, W. S., Eung, M. J., Kim, E. S., "Effect of BN filler on thermal properties of HDPE matrix composites", *Ceramic International*, **39**, S569-S573 (2013)

[5] Zhou. W., Wang, C., Ai, T., Wu, K., Zhao, F., Gu, H., "A novel fiber-reinforced polyethylene composites with added silicon nitride particles for enhanced thermal conductivity", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **40**, 830-836 (2009)

[6] ประณัฐโพธิยะราช.(2556) "พอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์" ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์กรุงเทพฯ

[7] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรมม, (2540). งานฉีดพลาสติก, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ

[8] บรรเลง ศรนิล, (2540). เทคโนโลยีพลาสติก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)กรุงเทพฯ

[9] บริษัทบางกอกโพลีเอธิลินจำกัด. (2542). Injection,กรุงเทพฯ

[10] วิริยะ ทองเรือง. (2554). วิศวกรรมพอลิเมอร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลั ยสงขลานครินทร์

[11] ดรรชนี พัทธวรากร. (2556). เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ (Polymer Processing Technology), ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรมคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่

[12] นายณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ. (2549) เอกสารโครงการสอนรายวิชาฉบับนี้ เป็นเอกสารเตรียมและวางแผนการสอนรายวิชา 11 - 413 - 301 Engineering Material (วัสดุวิศวกรรม)

[13] รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ กลุ่มวิจัยการผลิตและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

[14] อิทธิพล แจ้งชัด และสุภารัตน์ รักชลธี. 2548. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

[15] ชมพูนุท เจริญวุฒิลาภ. 2552. การศึกษารีโอโลจีของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คสำหรับการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

[16] Teng. C. C., Ma, C. C. M., Chiou, K. C. , Lee, T. M., "Synergetic effect of thermal conductive properties of epoxy composites containing functionalized multi-walled carbon nanotubes and aluminum nitride", *Composites Part B*, **43**(2), 265-271 (2012)
[17] Andrew A. B., Greg E. H., William G. F., Douglas M. D., Hsin W., "Mechanical and thermal properties of AlN-BN-SiC Ceramics", Mater. Sci. Eng. A, **494**, 239-246 (2008)
[18] Peter M., Namita R. C., Doris S., "Synthesis and characterisation of star polymer/silicon carbide nanocomposites", Mater. Sci. Eng. A, **434**, 360-364 (2006)
[19] เสกสรรค์ หัสดี. (2557). **การศึกษาสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนที่นากลับมาใช้ใหม่โดยการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา**. โครงร่างปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
[20] ประทุมมา สุโสะ. (2554). **สมบัติเชิงกลพลาสติก 3 ชนิด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิโพรพิลีน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, หน้า 22-23.
[21] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. (2540). **งานฉีดพลาสติก**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
[22] บรรเลง ศรนิล. (2540). **เทคโนโลยีพลาสติก**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
[23] เจริญ นาคะสรรค์. (2544). **กระบวนการแปรรูปพลาสติก (Polymer Processing)** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย