



## รายงานฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสมบัติของพอลิโพรพิลีน/ไฮบริดฟิลเลอร์คอมโพสิต โดยเติมอนุภาค  
โบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์

Properties of Polypropylene/Hybrid Filler Composites with Boron  
Nitride Particles and Carbon Fibers

วรรณพร ชีววุฒิพงศ์  
ชาตรี หอมเขียว  
จักรนรินทร์ ฉัตรทอง

Watthanaphon Cheewawuttipong  
Chatree Homkhiew  
Jaknarin Chatthong

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
งบประมาณ ประจำปี พ.ศ. 2559

การศึกษาสมบัติของพอลิโพรพิลีน/ไฮบริดฟิลเลอร์คอมโพสิต โดยเติมอนุภาค  
โบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์

วรรณพร ชีววุฒิพงศ์\* ชาตรี หอมเขียว และ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวโดยสารคู่ควบไททานเนตเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยทำการเติมสารเสริมแรงชนิดเดี่ยว คือ โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride) และ การผสมระหว่างสารเสริมแรงที่มีรูปร่างแตกต่างกัน คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ (Boron nitride/Carbon fibers) พบว่าปริมาณของสารเสริมแรงที่เติมในเนื้อพอลิโพรพิลีนมีผลต่อการเพิ่มสมบัติการนำความร้อน มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของพอลิโพรพิลีน/โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต สมบัติทางความร้อนคืออุณหภูมิหลอมเหลวและค่าความจุความร้อนมีแนวโน้มลดลง พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์มีค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของและอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าสารเสริมแรงที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว การเคลือบสารคู่ควบไททานเนตเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะระหว่างพอลิโพรพิลีนและสารเสริมแรง และเพิ่มความสามารถในการกระจายของสารเสริมแรงในเนื้อพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุเพิ่มขึ้น

คำหลัก พอลิโพรพิลีน, โบรอนไนไตรด์, คาร์บอนไฟเบอร์, สารคู่ควบไททานเนต

.....  
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีแปรรูปวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

## Properties of Polypropylene/Hybrid Filler Composites with Boron Nitride Particles and Carbon Fibers

Watthanaphon Cheewawuttipong\*, Chatree Homkhiew, Jaknarin Chatthong

### Abstract

The purpose of this research was to study the effect of surface modification titanate coupling agent for improving the properties of polypropylene composites combined with one type of fillers (Boron nitride), and mixed with different shape of fillers (Boron nitride/Carbon fibers). The result showed that the content of BN, BN/CF fillers had an effect on increasing thermal conductivity, storage modulus, and loss modulus whereas reducing melting temperature. The titanate coupling agent was surface modification by treating on fillers. The result revealed that treated BN/CF fillers had higher storage modulus, and loss modulus, and melting temperature than untreated fillers at the same content. Because of titanate coupling agent had an effect on improving the chemical bonding between polypropylene and fillers by improving dispersion behavior of fillers in polypropylene matrix lead to improving the mechanical properties and thermal properties of these materials.

**Keywords:** polypropylene, Boron nitride, Carbon fibers, Titanate coupling agent

---

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

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยสามารถทำวิจัยฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนจากงบประมาณ ประจำปี พ.ศ. 2559 สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์

ขอกราบขอบคุณครอบครัว ที่คอยส่งเสริมและเป็นกำลังใจ จนการทำวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและผู้ที่สนใจต่อไป

วรรณพร ชีววุฒิพงศ์  
ชาติรี หอมเขียว  
จักรนรินทร์ ฉัตรทอง



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ช)
สารบัญรูป	(ซ)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2.1 วัสดุผสม	7
2.2.2 พอลิเมอร์	9
2.2.3 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์	13
2.2.4 สมบัติการนำไฟฟ้า	20
2.2.5 การนำความร้อน	22
2.2.6 ความหนืดและสมบัติการไหล	25
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	<b>33</b>
3.1 การเตรียมวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) และวัสดุเนื้อพื้น (Polymer matrix)	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	36
3.3 เครื่องมือในการทดสอบสมบัติของวัสดุ	37
<b>บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	<b>40</b>
4.1 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยการเติมคาร์บอนไฟเบอร์	40
4.2 สมบัติการไหล (รีโอโลยี) ของพอลิโพรพิลีน/ไบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต	41
4.3 ผลการทดลองสมบัติทางความร้อน	52

	หน้า
4.4 ผลการทดลองสมบัติการนำความร้อน	53
4.5 โครงสร้างอัญฐานของวัสดุด้วย SEM	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและ ข้อเสนอแนะ บรรณานุกรม	59 60



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกลุ่มพอลิเมอร์หลัก 3 กลุ่ม	10
ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติเชิงความร้อนสำหรับวัสดุต่างๆ	25
ตารางที่ 4.1 ระบบการทดลองของพอลิพรพิลีน/โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต	40
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมเสริมแรงโบรอนไนไตรด์ และโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์	52



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติการนำความร้อนผลิตภัณฑ์	2
รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุผสม โดยจำแนกจากตัวเสริมแรง	8
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองแสดงพอลิเมอร์แบบเส้นตรงและแบบกิ่งก้าน (a) พอลิเมอร์แบบเส้นตรง การจัดเรียงตัวของสายโซ่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง และแต่ละสายโซ่ไม่ได้เชื่อมติดกัน (b) พอลิเมอร์แบบเส้นตรงชนิดมีกิ่งก้าน ลักษณะของสายโซ่มีกิ่งก้านแต่ไม่ได้เชื่อมติดกัน (c) เทอร์โมเซตติงชนิดไม่มีกิ่งก้าน สายโซ่เชื่อมติดกันด้วยพันธะ โคเวเลนต์แต่ไม่มีกิ่งก้าน (d) เทอร์โมเซตติงชนิดมีกิ่งก้านและสายโซ่เชื่อมติดกันด้วยพันธะ โคเวเลนต์ ลักษณะช่อง สายโซ่พอลิเมอร์ต่างชนิดแสดงด้วยเส้นสีที่แตกต่างกันและแสดงให้เห็นว่าสายโซ่ไม่ได้เชื่อมติดกัน ตำแหน่งที่สายโซ่เชื่อมติดกันแสดงตำแหน่งด้วยวงกลมทึบ	10
รูปที่ 2.3 รูปจำลอง 3 รูปแบบของลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีน (a) รูปแบบจำลองแบบ 3 มิติ (b) รูปแบบจำลองแบบ 3 มิติแบบแสดงพันธะ (c) รูปแบบจำลองแบบ 2 มิติ	11
รูปที่ 2.4 กราฟความเค้น - ความเครียดของไนลอน 6-6	12
รูปที่ 2.5 การเกิดคอคอดในพอลิเมอร์อสัณฐานจะไม่คงที่เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในตำแหน่งที่เกิดการคอคอดซึ่งส่งผลให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นและอัตราการเปลี่ยนรูปร่างจะลดลง	13
รูปที่ 2.6 เครื่องอัดรีดหรือแบบต่อเนื่อง	13
รูปที่ 2.7 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง	14
รูปที่ 2.8 แสดงการผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมโดยกระบวนการพอลิเมอร์คอมปาว	15
รูปที่ 2.9 การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยกลวิธีในการย่อย	16
รูปที่ 2.10 เครื่องผสมแบบต่างๆ	16
รูปที่ 2.11 เครื่องผสมแบบใบตีผสม	17
รูปที่ 2.12 เครื่องผสมแบบปิด	18
รูปที่ 2.13 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน	19
รูปที่ 2.14 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนหลายตัว	19
รูปที่ 2.15 เครื่องทำพลาสติกแบบร้อน	20
รูปที่ 2.16 เครื่องพลาสติกแบบอัดโน้มติ	20
รูปที่ 2.17 การคำนวณการนำความร้อนในวัสดุ	22
รูปที่ 3.1 ลักษณะการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวของสารเสริมแรงโดยการใช้สารคู่ควบไททานาต	34



	หน้า
รูปที่ 3.2 เปรียบผลของสารคู่ควบที่เคลือบผิวของสารเสริมแรง	34
รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนและกิจกรรมการดำเนินงานวิจัย	35
รูปที่ 3.4 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	36
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	36
รูปที่ 3.6 เตาอบไล่ความชื้น	37
รูปที่ 3.7 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอริเมทรี รุ่น Perkin Elmer DSC8500	37
รูปที่ 3.8 การนำความร้อน รุ่น Hot Disk/TPS 2500s	38
รูปที่ 3.9 สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป รุ่น FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)	38
รูปที่ 3.10 ทดสอบรีโอโลยี รุ่น Malvern Bohlin Gemini HR Nano Rheometer	39
รูปที่ 4.1 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีน คอมโพสิต โดยการผสมกับคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fibers) และคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Treated Carbon fibers)	41
รูปที่ 4.2 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัส ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพ สิต โดยการผสมโบรอนไนไตรด์ที่อัตราส่วน 30 40 และ 50% โดยน้ำหนัก	42
รูปที่ 4.3 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $Eta^*$ ), $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีน	43
รูปที่ 4.4 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $Eta^*$ ), $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่ เติมสารเสริมแรง 25% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่างการเติมสารเสริมแรง 1 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์ และสารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	44
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $Eta^*$ ), $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่ เติมสารเสริมแรง 35% โดยน้ำหนัก โบรอนไนไตรด์ และสารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการ ปรับปรุงพื้นผิว	45

	หน้า
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity (Eta <sup>*</sup> ), $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่ เติมสารเสริมแรง 45% โดยน้ำหนัก สารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/ คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	46
รูปที่ 4.7 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity (Eta <sup>*</sup> ), $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่ เติมสารเสริม 50 และ 55% โดยน้ำหนัก โบรอนไนไตรด์	47
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity (Eta <sup>*</sup> ), $\eta$ ) และ Tan delta กับความเครียดเฉือน (Shear strain) ของพอลิโพรพิลีน	48
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ มอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity (Eta <sup>*</sup> ), $\eta$ ) และ Tan delta กับความเครียดเฉือน (Shear strain) ของพอลิโพรพิลีน คอมโพสิต ที่เติมสารเสริมแรง 25% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่างการเติมสาร เสริมแรง 1 ชนิดคือ โบรอนไนไตรด์ และสารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/ คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	49
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ ( $\omega$ ) กับ (a) มอดุลัสการสะสม (Storage modulus, $G'$ ) และ (b) มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, $G''$ )	51
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงพลังงานเนื่องจากการดูดความร้อน ของพอลิโพรพิลีนค อมโพสิตที่เติมด้วยสารเสริมแรงจากโบรอนไนไตรด์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟ เบอร์	53
รูปที่ 4.13 ค่าการนำความร้อนของพอลิโพรพิลีน/โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ คอมโพสิต	54
รูปที่ 4.14 พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเติมสารเสริมแรงโบรอนไนไตรด์ ที่อัตราส่วนผสม 10 20% และ 30% โดยน้ำหนัก	55
รูปที่ 4.15 โครงสร้างออสัณฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต (a) 5 wt% CF และ (b) 10 wt% CF	57
รูปที่ 4.16 โครงสร้างออสัณฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต (a) 40 wt% BN/5 wt% CF (b) Treated 40 wt% BN/5 wt% CF และ (c) 50 wt% BN	58

# บทที่ 1

## บทนำ

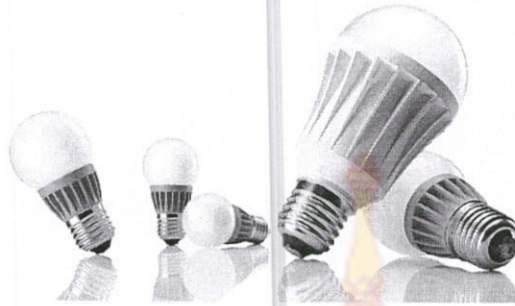
### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในสมัยก่อนเครื่องใช้ในครัวเรือนและผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะผลิตจากไม้ โลหะ แก้ว กระดาษ หนังสัตว์ ยาง เป็นต้น แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตวัสดุที่สามารถทดแทน และเพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้ ส่งผลให้วัสดุพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย อันเนื่องมาจากคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความน้ำหนักเบา มีความสามารถในการยึดตัวและขึ้นรูปได้ง่าย มีสมบัติความเป็นฉนวน ราคาถูก พอลิเมอร์ที่ใช้โดยทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิสไตรีน (PS) ไนลอน พอลิคาร์บอเนต (PC) และ ยาง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุพอลิเมอร์มีข้อด้อยในด้านความแข็งแรง ความสามารถในการนำความร้อน และอุณหภูมิหลอมเหลว จึงส่งผลให้กิจการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์

ในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในงานอากาศยาน อุปกรณ์กีฬา อุตสาหกรรมยานยนต์ รวมทั้งอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และอื่นๆ มีความต้องการวัสดุที่มีสมบัติโดดเด่นหลายด้านในวัสดุเพียงชนิดเดียว ซึ่งวัสดุคอมโพสิต (Composites) ที่เกิดจากการผสมของโลหะ เซรามิกส์ และพอลิเมอร์ สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าว ด้วยเหตุนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในการผลิตวัสดุใหม่ที่ตรงตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรมและผู้บริโภค ซึ่งวัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ (Polymer matrix composites) หรือพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย เพราะมีคุณสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิห้อง ราคาถูก ผลิตง่าย น้ำหนักเบา ทนทานการกัดกร่อน ขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมเนื้อพอลิโลหะวัสดุผสมเนื้อพอลิเซรามิกส์ จากรูปที่ 1 แสดงผลิตภัณฑ์หลอด LED ที่ฐานหลอดผลิตจากพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งเดิมฐานหลอดจะทำมาจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์หรือเซรามิกส์ ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้งานเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ต้องมีสมบัติการนำความร้อนเพื่อสามารถระบายความร้อนสู่ภายนอก และเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุ อีกทั้งอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีบทบาทสำคัญในการสร้างรายได้ให้แก่ประเทศและเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งอุปกรณ์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันหรือในงานอุตสาหกรรมมีความต้องการวัสดุดูดซับความร้อน (Heat sink) เพื่อช่วยในการระบายความร้อนสู่ภายนอก และเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุ ตัวอย่างเช่นหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ในคอมพิวเตอร์มีความเร็วเพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูง การระบายความร้อนด้วยพัดลมเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีแผ่นระบายความร้อนประกอบกับพัดลม ซึ่งวัสดุที่นำมาทำแผ่นระบายความร้อน เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งความร้อนจะกระจายผ่านครีปและส่งต่อไปยังช่องระบายความร้อนสู่ภายนอก วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นอะลูมิเนียม เนื่องจากมีความสามารถในการนำความร้อนสูง (Thermal conductivity) และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ เนื่องจากสีทิงค์มีรูปร่างซับซ้อน ส่งผลให้กระบวนการผลิตหลายขั้นตอน ทำให้ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง

วัสดุดูดซับความร้อนหรือวัสดุนำความร้อน (High thermal conductivity materials) ซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้งานวิจัยในด้านนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติการนำความร้อนกำลังเป็นสนใจอย่างกว้างขวาง อันเนื่องมาจากข้อได้เปรียบด้านน้ำหนัก สามารถขึ้นรูปที่ซับซ้อนได้ ราคาถูก ถึงแม้ว่าสมบัติ

การนำความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะดีกว่าอะลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติการนำความร้อนดีกว่าวัสดุพอลิเมอร์



รูปที่ 1.1 พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติการนำความร้อนผลิตภัณฑ์จาก Nytex composites Co., Ltd. ประเทศไต้หวัน และ SpecialChem S.A. ประเทศฝรั่งเศส

วัสดุเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถเป็นเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตติงหรืออีลาสโตเมอร์ ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ นอกจากนี้วัสดุที่นำมาเป็นเนื้อเมทริกซ์ควรมีสมบัติเชิงกลที่ดี วัสดุเสริมแรงที่เติมในพอลิเมอร์คอมโพสิตมีหลายชนิด เช่น คาร์บอนไฟเบอร์ คาร์บอนแบลค เซรามิก และโลหะผง เพื่อเพิ่มสมบัติต่างให้แก่พอลิเมอร์ เช่น การนำความร้อน แข็งแรง ทนทานการกัดกร่อน และทนการสึกหรอ เป็นต้น ซึ่งสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเสริมแรง เช่น ขนาด รูปร่าง การกระจายตัว ปริมาณ การเรียงตัว เป็นต้นพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปวัสดุเสริมแรงที่ใช้จะเป็นโลหะผง เช่น อะลูมิเนียม (Al) นิกเกิล (Ni) ซิลเวอร์ (Ag) และคาร์บอน เช่น คาร์บอนดีไฟเบอร์ คาร์บอนนาโนทิวบ์กราฟต์แต่พอลิเมอร์ผสมที่เติมด้วยโลหะผงจะมีข้อด้อยในเชิงของน้ำหนักของวัสดุ เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุทั้งสองชนิด เป็นต้น ด้วยเหตุนี้วัสดุเสริมแรงประเภทคาร์บอน จึงถูกนำมาแทนที่การเติมด้วยโลหะผง เนื่องจากคาร์บอนมีสมบัติเด่น เช่น น้ำหนักเบา นำความร้อน นำไฟฟ้า ความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมี ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ทางคณะวิจัยจึงเล็งเห็นความเป็นได้ในการเลือกใช้วัสดุเสริมแรงกลุ่มคาร์บอน เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล การนำความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ซึ่งเลือกใช้พอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์กลุ่มพอลิโอเลฟินส์ ที่มีสมบัติเชิงกลและทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน และสามารถนำมาใช้ประโยชน์มากมายตัวอย่างการใช้งานของวัสดุที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว (Surface resistivity)

จากการศึกษาวรรณกรรมพบว่าวัสดุเสริมแรงหลายชนิดสามารถเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น โลหะ คาร์บอน (คาร์บอนแบล็ค คาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนไฟเบอร์) [1-2] โบรอนไนไตรด์ อะลูมินา [3] อะลูมิเนียมไนไตรด์ [4-5] ไมกา ซิงค์ออกไซด์ และ แก้ว [6-8] เป็นต้น ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต คือ ปริมาณ รูปร่าง และการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงในเนื้อพอลิเมอร์ เป็นต้น โดยทั่วไปพอลิเมอร์คอมโพสิตจะผลิตด้วยการทำคอมปาวด์โดยการหลอมผสม (Melt compounding) ด้วยเครื่องอัดรีดหรือแบบต่อเนื่อง (Extruder machine) และ เครื่องผสมแบบแบตหรือแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch mixer)

โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride: BN) ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติการนำความร้อนสูง ทนการสึกหรอ มีความแข็ง เป็นฉนวนไฟฟ้า ได้ถูกนำมาศึกษาอย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มสมบัติการนำความร้อน การขยายตัวทางความร้อน สมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) [3], พอลิโ

รพีสีน (PP) [8], โนโวแลคเรซิน (Novolac resin) [9], อีพอกซี (Epoxy) [10] เป็นต้น นอกจากนี้วัสดุในกลุ่มคาร์บอนเช่น คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fiber: CF) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube : CNT) เป็นต้น ซึ่งวัสดุกลุ่มคาร์บอนสามารถเพิ่มสมบัติให้แก่พอลิเมอร์ เช่น สมบัติการนำความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น ถูกนำมาแทนที่วัสดุสารเสริมแรงกลุ่มโลหะเนื่องจากปัญหาเรื่องการออกซิเดชันและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรง ด้วยเหตุนี้ปริมาณความต้องการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยการเติมสารเสริมแรงกลุ่มคาร์บอนจึงสูงขึ้น ทำให้มีงานการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย [11] นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติการนำความร้อน สามารถนำทดแทนวัสดุโลหะเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุถ่ายเทความร้อน โดยนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้วัสดุเสริมแรงคาร์บอนไฟเบอร์ [12] และ คาร์บอนนาโนทิวบ์ [13] พบว่าสามารถผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิเมอร์ อีกทั้งยังสามารถนำความร้อนและเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ จากงานวิจัยข้างต้นเป็นการศึกษาการใช้วัสดุเสริมแรงเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เกิดจากผสมระหว่างวัสดุเสริมแรงที่มากกว่าหนึ่งชนิด ที่มีรูปร่าง ขนาด และชนิดที่แตกต่างหรือ ไฮบริดฟิลเลอร์ (Hybrid filler) จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าวัสดุใหม่นี้ มีสมบัติเชิงกล การนำความร้อน การขยายตัวทางความร้อนที่เหนือกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมวัสดุเสริมแรงเพียงชนิดเดียว [14-15]

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮบริดฟิลเลอร์โดยการผสมระหว่างอนุภาคโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งเป็นการผสมระหว่างสารเติมที่มีรูปร่าง ขนาด และ ชนิดที่แตกต่างกัน อีกทั้งการศึกษาลักษณะของการกระจายตัวอัตราส่วนของวัสดุเสริมแรงที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติของพอลิโพรพิลีน และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ซึ่งงานวิจัยในแนวนี้นี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสามารถผลิตวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถนำไปประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรงไฮบริดฟิลเลอร์ระหว่างคาร์บอนไฟเบอร์และอนุภาคโบรอนไนไตรด์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนและการกระจายตัวของสารเสริมแรงคาร์บอนไฟเบอร์และอนุภาคโบรอนไนไตรด์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อน สมบัติความเป็นฉนวน

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 การคอมปาวด์พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับสารเติมที่มีรูปร่าง ขนาด และ ชนิดที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยอนุภาคโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์ โดยการหลอมผสม ด้วยเครื่องผสมแบบชุด (Batch mixing)

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนและการกระจายตัวของสารเสริมแรงไฮบริดฟิลเลอร์ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ เป็นต้น

1.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีน/ไฮบริดฟิลเลอร์คอมโพสิต โดยเติมอนุภาคโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถผลิตแผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีน/ไฮบริดฟิลเลอร์คอมโพสิต โดยใช้สารเสริมแรงผสมระหว่างอนุภาคโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์

1.4.2 สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนโดยการเติมไฮบริดฟิลเลอร์และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุอีกทางหนึ่ง

1.4.3 คาดว่างานวิจัยฉบับนี้จะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีสมัยใหม่ต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการในวัสดุทั่วไปเช่นโลหะ เซรามิกและพอลิเมอร์ วัสดุเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมทางด้านอากาศยาน การขนส่ง อุตสาหกรรมอุปกรณ์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้นโครงการวิจัยมีกรอบแนวความคิดคือ ศึกษาปริมาณ การเติมและความสามารถในการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์ในวัสดุเนื้อพอลิโพรพิลีนที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติของวัสดุผสม

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhou และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นคอมโพสิตโดยการเติมอนุภาคอะลูมิเนียม โดยการทำคอมปาวด์ ด้วยการหลอมเหลว พบว่าวัสดุผสมมีสมบัติการนำความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้สมบัติทางความร้อนเช่นอุณหภูมิหลอมเหลว และความเป็นคริสตัลไลน์ ขึ้นอยู่กับปริมาณ และขนาดของอนุภาคของอะลูมิเนียม แต่พบปัญหาเรื่องการออกซิเดชันของอะลูมิเนียม และความไม่เป็นเนื้อเดียวของพอลิเมอร์ผสม ด้วยเหตุนี้ปริมาณความต้องการวัสดุพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสามารถตอบสนองความต้องการของตลาดที่ให้คุณสมบัติโดดเด่นหลายประการที่ไม่สามารถมีได้ในวัสดุทั่วไป ซึ่งงานวิจัยได้ให้ความสนใจวัสดุในกลุ่มคาร์บอนเช่น คาร์บอนแบลค (Carbon black) คาร์บอน ไฟเบอร์ (Carbon fiber: CF) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube : CNT) เป็นต้นซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติให้แก่พอลิเมอร์เช่น สมบัติการนำความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น

Zhou และคณะ [16] นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดและการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์ต่อสมบัติการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณและขนาดของโบรอนไนไตรด์มีผลต่อการเพิ่มสมบัติการนำความร้อน โดยการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์มีส่วนสำคัญต่อสร้างเครือข่ายการนำความร้อนในพอลิเมอร์เมทริกซ์

Han และ Fina [ ] ทำการศึกษาพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการนำความร้อน เพื่อนำมาทดแทนวัสดุโลหะที่สามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับมอเตอร์ เจนเนอเรเตอร์ วัสดุถ่ายเทความร้อน เป็นต้น ซึ่งนักวิจัยทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้วัสดุเสริมแรงคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่มีสมบัติการนำความร้อนดีเยี่ยมและสามารถนำไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ได้เลือกใช้พอลิเมอร์เมทริกซ์หลายชนิดเช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์ พอลิเอสเตอ์ พอลิสไตรีน เป็นต้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมด้วยวัสดุเสริมแรงคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีผลต่อการเพิ่มสมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อน และเพิ่มการนำไฟฟ้าในวัสดุ

Koyama และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยเลือกใช้เวเฟอร์โกลนคาร์บอนไฟเบอร์ (Vapor grown carbon fiber : VGCF) ซึ่งเป็นคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติระหว่างคาร์บอนไฟเบอร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ และมีราคาถูกกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ คณะผู้วิจัยพบว่าพอลิโพรพิลีนผสมด้วยเวเฟอร์โกลนคาร์บอนไฟเบอร์ มีค่างมอดูลัสสูง ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน

Hammel และคณะ [12] ทำการศึกษาพบว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าวัสดุมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมวัสดุเสริมแรงคาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลต่อการเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

Li และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณวัสดุเสริมแรงที่เติมในพอลิเอเทอร์เอไมด์ พบว่าเมื่อเติม คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ 1% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอเพิ่มขึ้น 50% และความเหนียวเพิ่มขึ้น 550% แต่สมบัติการทนทานต่อการสึกหรอลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอเทอร์เอไมด์ ได้มีการศึกษาโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่งกราดอีกด้วย

Yu และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่มีสามารถนำความร้อนได้ดี โดยการผสมระหว่างพอลิสไตรีนกับอะลูมิเนียมไนไตรด์(ALN) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมกระจายตัวของสารเสริมแรงในวัสดุผสม ทำการศึกษาถึงปัจจัยของปริมาณของสารเสริมแรง ขนาดของพอลิสไตรีน และอุณหภูมิ จากผลการทดลอง พบว่าพอลิสไตรีนคอมโพสิตที่เติมอะลูมิเนียมไนไตรด์ 20% โดยปริมาตร มีสมบัติการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่าของพอลิสไตรีน พอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนของพอลิสไตรีน/อะลูมิเนียมไนไตรด์คอมโพสิต นอกจากนี้ยังมีการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์การนำความร้อนของวัสดุผสมอีกด้วย

Xu และคณะ [19] ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมอะลูมิเนียมไนไตรด์ต่อสมบัติของพอลิไวนิล ลิดีนฟลูออไรด์(PDVF)คอมโพสิตหรืออีพ็อกซีจากผลการทดลองพบว่า การเติมอะลูมิเนียมไนไตรด์มีผลต่อลดความแข็งตึง โมดูลัส และความเหนียวของพอลิเมอร์เนื้อ และมีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมโดยการดูดซับความชื้น ที่ปริมาณการเติมอะลูมิเนียมไนไตรด์ 60% โดยปริมาตร จะมีค่าการนำความร้อนสูงสุด

Jung และคณะ [20] รายงานว่าสารเติมที่เป็นสารอินทรีย์และอินทรีย์ที่เติมในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อิเล็กทรอนิกส์แพคเกจ การแพทย์ เครื่องมือ ยานยนต์ เป็นต้น ซึ่งสารเติมเหล่านี้มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล ความร้อน การนำไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ทั่วไป นอกจากนี้ยังวิจัยพบว่าโบรอนไนไตรด์เมื่อเติมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้วัสดุผสมดังกล่าวมีสมบัติโดดเด่นในด้านการนำความร้อนและเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อนุภาคขนาดเล็กโบรอนซ์มีผลสำคัญต่อการประสิทธิภาพการไหลในกระบวนการผสม

Choi และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุผสมที่มีการเติมด้วยอะลูมิเนียมไนไตรด์และโบรอนไนไตรด์ พบว่า พอลิเมอร์โบรอนไนไตรด์คอมโพสิตมีการนำความร้อน และความเป็นฉนวนที่ดีกว่าพอลิเมอร์อะลูมิเนียมไนไตรด์ เนื่องจากอะลูมิเนียมไนไตรด์เมื่อสัมผัสกับความชื้น จะทำให้เกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งสารดังกล่าวมีผลต่อการลดประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุผสม

Shin และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณและขนาดของโบรอนไนไตรด์ที่เติมในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พบว่าสมบัติการนำความร้อน การแพร่กระจายความร้อน ความร้อนที่แฝงที่ใช้ในการสลายพันธะ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโบรอนไนไตรด์ที่ใช้ เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของสารเติมเท่ากัน พบว่าโบรอนไนไตรด์ที่มีขนาดใหญ่จะมีประสิทธิภาพความร้อนที่ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก อีกทั้งทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องการผสมอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันของโบรอนไนไตรด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมด้วยโบรอนไนไตรด์ที่ผสมระหว่างอนุภาคต่างขนาดกัน มีการนำความร้อนสูงกว่าการเติมด้วยโบรอนไนไตรด์เพียงขนาดเดียว อีกนัยหนึ่งการจัดเรียงตัวของโบรอนไนไตรด์มีผลต่อการเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง

ประณัฐ โพธิยะราช [21] พอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ นำเสนอว่า แต่เดิมพอลิเมอร์ที่ใช้ ส่วนใหญ่จะมาจากธรรมชาติ จนกระทั่งประมาณ 30 ปีที่แล้ว อุตสาหกรรมปิโตรเคมีเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น จึงมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ มาทดแทนของเดิมที่ใช้อยู่ เช่น ขวดพลาสติกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ มาใช้แทนขวดแก้ว ฯลฯ แต่ปัจจุบันแหล่งทรัพยากรทางปิโตรเคมีเริ่มมีปริมาณน้อยลง แนวโน้มการวิจัยด้านพอลิเมอร์ จึงหันมาใช้พอลิเมอร์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติมากขึ้น



สำหรับการวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นการนำ พอลิเมอร์สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะหรือเป็นการนำลักษณะเด่นของพอลิเมอร์ แต่ละชนิดมารวมกัน ผู้วิจัยเลือกใช้อย่างธรรมชาติ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ประเทศไทยสามารถผลิตขึ้นเองได้ และยังเป็นประเทศที่ส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลกอีกด้วย จึงต้องการนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติให้สูงขึ้น โดยนำมา ผสมกับอีพอกซีเรซิน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรง มักใช้ในการเสริมแรงให้กับเส้นใยชนิดต่างๆ เช่น ใช้ในการผลิต ชิ้นส่วนจักรยานเสือภูเขา ชิ้นส่วนเครื่องบิน ฯลฯ ซึ่งจะช่วยเสริมความเหนียวของยางธรรมชาติ และลดความเปราะของอีพอกซีเรซิน

K. Oksman และคณะ [22] ศึกษาการใช้เส้นใยจากปอ (Flax) เสริมแรงในการผลิตวัสดุคอมโพสิตโดยใช้พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ดดยนิยมนำมาผลิตเป็นถุพลาสติก และแก้วน้ำ ซึ่ง PLA สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้นในวัสดุคอมโพสิตได้ เนื่องจากข้อดีของเรื่องความเปราะแตกหักง่ายจึงได้นำไตรอะเซทิน (Triacetin) มาเติมเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเวซอร์ ในการปรับปรุงวัสดุคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด/เส้นใยปอ ที่ทำการผสมด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ และขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) จากผลการทดลองพบว่าการผสมเส้นใยจากปอมีผลต่อการเพิ่มสมบัติทางกลของวัสดุ นอกจากนี้จากการศึกษาโครงสร้างอณูฐานการยึดเกาะระหว่างระหว่างเส้นใยและสารเสริมแรงดีกว่าการไม่เติมไตรอะเซทิน แต่ไม่ได้มีผลในเชิงบวกกับสมบัติในการทนต่อแรงกระแทก

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นพบว่าการเพิ่มสมบัติการนำความร้อน สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์นั้น สามารถทำได้ด้วยการเลือกชนิดและปริมาณที่เหมาะสม โดยการเติมสารเติมเพียงชนิดเดียวหรือมากกว่า 1 ชนิด แต่อย่างไรการผลิตรวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติที่ดี และต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นที่ต้องการในภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งเป็นการผลิตรวัสดุผสมชนิดใหม่อีกด้วย ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้น โดยการศึกษาปัจจัยอัตราส่วนผสม การกระจายตัวของสารเติมไฮบริดฟิลเลอร์ที่เกิดจากการผสมระหว่างอนุภาคโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์ ในพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 วัสดุผสม [23-25]

วัสดุผสมเป็นวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของวัสดุหรือเฟสที่มากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปเพื่อสร้างสมบัติที่ไม่สามารถพบได้ในวัสดุเพียงชนิดเดียว วัสดุผสมอาจได้จากการเลือกวัสดุหลายชนิดมา ผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่โดดเด่นด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรง หนัก ความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ความสามารถต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรง และสมบัติการนำไฟฟ้า จุดเด่นของวัสดุผสมอยู่ที่การนำวัสดุที่แตกต่างกันมาผสมกันแล้วสามารถก่อให้เกิดสมบัติที่เป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างกลมกลืน วัสดุเหล่านี้ได้รับการพัฒนาให้มีค่าความแข็งแรง จำเพาะสูงขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน ส่วนประกอบของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุปกรณ์กีฬา

วัสดุผสมโดยทั่วไปจำแนกชนิดตามรูปร่างหรือลักษณะทางธรรมชาติของเฟสที่กระจายตัว เช่น ผงอนุภาควิสเกอร์ (Whiskers) หรือเส้นใยวิสเกอร์ มีลักษณะคล้ายกับเส้นใยแต่มีความยาวน้อยกว่าการเกิดพันธะระหว่างเฟสที่กระจายตัวและเฟสพื้นหลักมีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของ วัสดุผสม โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมจะทำหน้าที่เป็นสารประสานยึดติด (Coupling agents) โดยโมเลกุลเหล่านี้จะสร้างพันธะระหว่างเฟสที่กระจายตัวกับเฟสพื้นหลัก

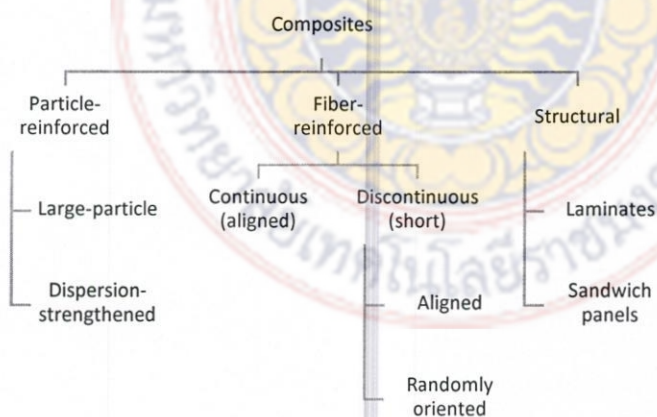
### 2.2.1.1 วัสดุผสมเพิ่มความแข็งแรงด้วยเฟสกระจาย (Dispersion-Strengthened Composites)

วัสดุผสมขนาดนาโนที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยเฟสกระจายประกอบด้วยผงอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10-250 นาโนเมตร โดยปกติเฟสกระจายได้แก่ ผงออกไซด์ของโลหะ ด้วยความเป็นผงอนุภาคขนาดเล็ก มันจึงสามารถกระจายตัวในพื้นที่หลักได้โดยไม่จำเป็นต้องเกาะยึด กับวัสดุพื้นหลัก เมื่อผงอนุภาคนี้สามารถกระจายได้ในพื้นที่หลักจึงมีประโยชน์สำหรับขีดขวางการ เคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและส่งผลให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิห้อง วัสดุผสมเพิ่มความแข็งแรงด้วยเฟสกระจายจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า โลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็ง (Age-hardened alloy) ซึ่งมีพันธะการยึดเกาะของอนุภาคที่ตกตะกอน อย่างไรก็ตาม วัสดุผสมกลุ่มนี้ไม่สามารถทำให้อ่อนตัวได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง หรือด้วยการเติบโตของเกรน หรือด้วยเฟสกระจายตัวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุผสมจะลดลงเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเท่านั้น และสามารถต้านทานต่อการคืบได้ดีกว่าวัสดุกลุ่ม โลหะและโลหะผสม

วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composites) จะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มย่อย คือ

1. วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่หรือเม็ดผง ซึ่งวัสดุผสมประเภทนี้เฟสอนุภาคจะมีความแข็งแรงและมอดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าวัสดุเนื้อพื้น อนุภาคเหล่านี้จะเหนียวรั้งหรือยับยั้งการเคลื่อนตัวของวัสดุเนื้อพื้นในบริเวณที่อยู่ใกล้อนุภาคนั้น วัสดุเนื้อพื้นสามารถส่งผ่านความเค้นไปสู่ออนุภาคที่รับแรงได้สูง ระดับความสามารถในการเสริมแรงหรือการปรับปรุงสมบัติทางกลขึ้นอยู่กับความยึดเหนียวที่แข็งแรง บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเนื้อพื้นกับสารเสริมแรง

2. วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็กละเอียด อนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก โดยปกติจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.01-0.1 ไมครอน หรือ 10-100 นาโนเมตรเท่านั้น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั้นมาจากปฏิกิริยาระหว่างวัสดุเนื้อพื้นกับอนุภาคในระดับอะตอมหรือโมเลกุล กลไกการรับแรงเกิดจากวัสดุเนื้อเป็นบริเวณที่รับแรงส่วนใหญ่ อนุภาคขนาดเล็กช่วยยับยั้งการเกิดดิสโลเคชัน ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนรูปยากขึ้นซึ่งต้องใช้แรงกระทำสูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรงที่จุดคราก และความแข็งแรงสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุผสม โดยจำแนกจากตัวเสริมแรง

### 2.2.1.2 สมบัติของวัสดุพื้นหลัก (Matrix Properties)

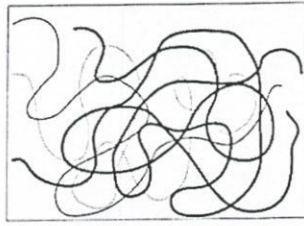
วัสดุพื้นหลักทำหน้าที่พยุงและรักษาเส้นใยให้อยู่ใน ตำแหน่งที่เหมาะสม ส่งถ่ายแรงกระทำสู่เส้นใยที่แข็งแรง ป้องกันเส้นใยเกิดความเสียหายในระหว่าง การผลิตวัสดุผสม โดยทั่วไปวัสดุพื้นหลักจะมีหน้าที่หลักในการควบคุมสมบัติการนำไฟฟ้า ลักษณะทางเคมี และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง วัสดุผสมพื้นหลักพอลิเมอร์ (polymer-matrix composites: PMCs) เป็นชนิดที่ใช้งานโดยทั่วไป ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติงสามารถใช้งานได้กับ เส้นใยแก้ว การผลิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบแผ่นและการขึ้นรูปแบบก้อนนั้น พอลิเมอร์กลุ่ม โพลีเอไมด์จะสามารถประยุกต์ใช้งานได้ที่ระดับอุณหภูมิสูง วัสดุผสมพื้นหลักโลหะ (metal-matrix composites: MMCs) ชนิดที่นิยมใช้กันมากได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองแดง นิกเกิล และโลหะผสมสารประกอบกึ่งโลหะ โดยเสริมแรงด้วยเซรามิกและเส้นใยโลหะ ชิ้นส่วนอากาศยาน และชิ้นส่วนยานยนต์ผลิตด้วยวัสดุผสมพื้นหลักกลุ่มนี้ซึ่งสามารถใช้งานได้ที่ระดับอุณหภูมิสูง แต่ราคา แพงและยากต่อการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมพื้นหลักพอลิเมอร์ วัสดุผสมพื้นหลักเซรามิก (ceramic-matrix composites: CMCs) มีสมบัติเด่นด้านการใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง น้ำหนักเบากว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมพื้นหลักโลหะชนิดที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง

### 2.2.2 พอลิเมอร์

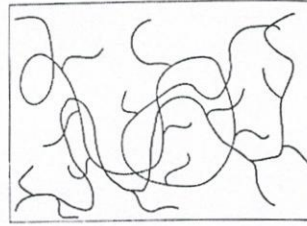
คำว่า “mer (เมอร์)” มักใช้เป็นคำต่อท้ายมีความหมายว่า “หน่วย” ในบทความนี้คำว่า mer (เมอร์) หมายถึง กลุ่มของอะตอมหรือโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยจำนวนมากยึดเหนี่ยวด้วยพันธะเคมีเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ โดยจะมีน้ำหนัก โมเลกุลตั้งแต่ 10,000-1,000,000 กรัม/โมล พลาสติกแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มได้แก่ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตติง และอีลาสโตเมอร์ (ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์) พลาสติกเป็นวัสดุที่ผลิต จากพอลิเมอร์ โดยอาจจะเกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือการสังเคราะห์ซึ่งเติมสารเติมแต่ง (additive) เช่น เส้นใย สารเพิ่มเนื้อสี มีน้ำหนักเบา ด้านทานการกัดกร่อนและมีความเหนียวยืดหยุ่น แต่มีความแข็งแรงต่ำไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมีราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่ายหลากหลายรูปแบบ เช่น ผลิตเป็นถุงพลาสติก เฟือง และอ่างอาบน้ำ เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงการผลิตพอลิเมอร์ ให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 350°C ซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง โดยส่วนมากจะผลิตในรูปแบบเส้นใย และบางชนิดมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะ

#### 2.2.2.1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ (Classification of Polymers)

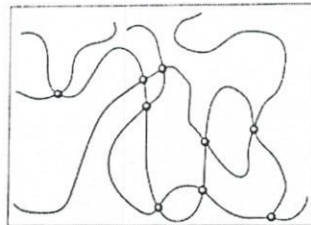
การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการสังเคราะห์จากโครงสร้างทางเคมีหรือจำแนกจากลักษณะการจัดเรียงอะตอมบนสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งแบ่งออกเป็นพอลิเมอร์แบบ เส้นตรง (linear polymer) หรือพอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน (branched polymer) ดังรูปที่ 16.1 พอลิเมอร์ แบบเส้นตรงประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลขนาดยาว ส่วนพอลิเมอร์แบบกิ่งก้านประกอบด้วยสายโซ่ หลักขนาดยาวและกิ่งขนาดสั้นอยู่บนสายโซ่หลัก อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์แบบเส้นตรงก็ไม่ได้ หมายความว่า จะมีรูปแบบเป็นเส้นตรงเสมอ ดังนั้นวิธีการที่สะดวกกว่าในการจำแนกประเภทของพอลิเมอร์คือการใช้สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน ตารางที่ 2.1 เป็นการเปรียบเทียบ กลุ่มพอลิเมอร์หลัก 3 กลุ่มคือ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ และอีลาสโตเมอร์



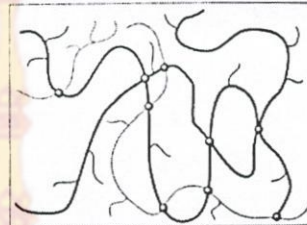
(a) Linear unbranched



(b) Linear branched



(c) Thermoset-unbranched



(d) Thermoset-branched

รูปที่ 2.2 ภาพจำลองแสดงพอลิเมอร์แบบเส้นตรงและแบบกิ่งก้าน (a) พอลิเมอร์แบบเส้นตรง การจัดเรียงตัวของสายโซ่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง และแต่ละสายโซ่ไม่ได้เชื่อมติดกัน (b) พอลิเมอร์แบบเส้นตรงชนิดมีกิ่งก้าน ลักษณะของสายโซ่มีกิ่งก้านแต่ไม่ได้เชื่อมติดกัน (c) เทอร์โมเซตติงชนิดไม่มีกิ่งก้าน สายโซ่เชื่อมติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์แต่ไม่มีกิ่งก้าน (d) เทอร์โมเซตติงชนิดมีกิ่งก้านและสายโซ่เชื่อมติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ลักษณะช่อง สายโซ่พอลิเมอร์ต่างชนิดแสดงด้วยเส้นสีที่แตกต่างกันและแสดงให้เห็นว่าสายโซ่ไม่ได้เชื่อมติดกัน ตำแหน่งที่สายโซ่เชื่อมติดกันแสดงตำแหน่งด้วยวงกลมทึบ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกลุ่มพอลิเมอร์หลัก 3 กลุ่ม

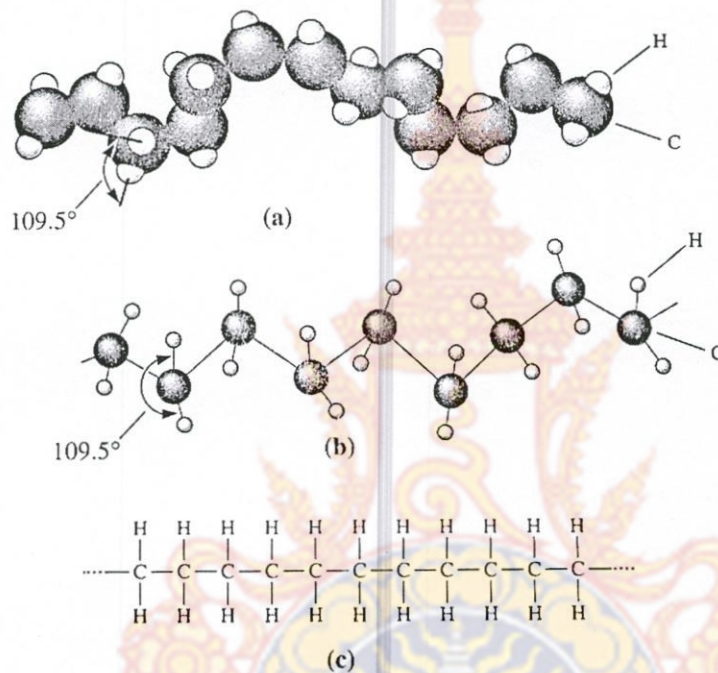
Behavior	General Structure	Example
Thermoplastic	Flexible linear chains (straight or branched)	Polyethylene
Thermosetting	Rigid three-dimensional network (chains may be linear or branched)	Polyurethanes
Elastomers	Thermoplastics or lightly cross-linked thermosets, consist of spring-like molecules	Natural rubber

**เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics)** ประกอบด้วยสายโซ่ยาวที่เกิดจากมอนอเมอร์เชื่อมต่อกัน โดยที่สายโซ่อาจมีหรือไม่มีกิ่งก้านก็ได้ สายโซ่แต่ละสายมีลักษณะบิดเป็นเกลียวพันกันและมีการสร้างพันธะระหว่างสายโซ่ด้วยแรงอย่างอ่อนเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ระหว่างอะตอมในแต่ละสายโซ่ สายโซ่ในเทอร์โมพลาสติกสามารถถูกทำลายด้วยแรงเค้นดึง เทอร์โมพลาสติกมีชนิดที่เป็นอสัณฐานและมีผลึก เปลี่ยนแปลงรูปร่างและหลอมละลายเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้น พลาสติกชนิดนี้จึงสามารถนำมารีไซเคิลได้ง่าย

เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุล (อาจเป็นเส้นตรงหรือมีกิ่งก้าน) ที่มีการสร้างโครงข่าย 3 มิติกับสายโซ่อื่น ดังนั้นเทอร์โมเซตติงจึงมีความ แข็งแรงมากแต่เปราะกว่าเมื่อเทียบกับ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตติงไม่หลอมละลายเมื่อได้รับความร้อนแต่จะสลายตัว ทำให้พลาสติกชนิดนั้นไม่สามารถนำมาผ่านกระบวนการผลิตใหม่ได้หรือ นำมารีไซเคิลได้ยาก

อีลาสโตเมอร์ (Elastomer) รู้จักกันดีที่เราเรียกกันว่า ยาง (rubber) เพราะพลาสติกชนิดนี้ สามารถเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นได้มากกว่า 200% พลาสติกประเภทนี้สามารถเป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตติงที่มีการสร้างพันธะโครงข่าย 3 มิติที่ไม่แข็งแรง

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer) เป็นพอลิเมอร์กลุ่มพิเศษซึ่ง มีกระบวนการผลิตแบบเทอร์โมพลาสติก และมีสมบัติยืดหยุ่นได้เช่นเดียวกับอีลาสโตเมอร์



รูปที่ 2.3 รูปจำลอง 3 รูปแบบของลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีน (a) รูปแบบจำลองแบบ 3 มิติ (b) รูปแบบจำลองแบบ 3 มิติแบบแสดงพันธะ (c) รูปแบบจำลองแบบ 2 มิติ

ผลึกคำนวณได้จากความหนาแน่นของพอลิเมอร์

$$\%Crystalline = \frac{\rho_c(\rho - \rho_a)}{\rho(\rho_c - \rho_a)} \times 100 \quad (1)$$

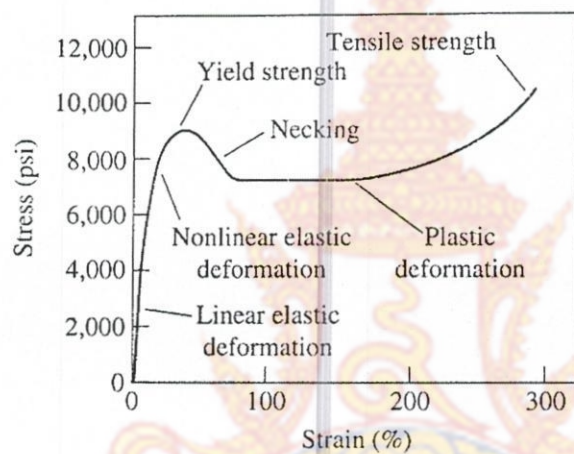
เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่นที่วัดได้ของพอลิเมอร์  $\rho_a$  คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงสร้าง อัสัฐาน  $\rho_c$  คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึก เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) สามารถวัดระดับความเป็นผลึกและระยะแลททิซของ พอลิเมอร์ผลึกเดี่ยวได้

เทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างผลึกซึ่งประกอบด้วยโซ่ที่ขยับซ้อนกันจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น พอลิเอทิลีน (มีไฮโดรเจนเป็นโซ่ที่ขยับ) และสามารถเกิดผลึกได้ง่ายกว่าพอลิสไตรีน (มีเบนซีน เป็นโซ่ที่ขยับ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) มีความเป็นผลึกสูง ดังนั้นจะมีความหนาแน่น  $0.97 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.92 \text{ g/cm}^3$  เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มี

ลักษณะกึ่งก้านที่ทำให้เกิดผลึกได้น้อยกว่า พอลิเมอร์ที่เป็นผลึกอย่าง สมบูรณ์จะไม่มีอุณหภูมิเสมือนแก้ว แต่ ส่วนที่เป็นอสัณฐานในโครงสร้างก็ผลึกของพอลิเมอร์ จะแสดงลักษณะเสมือนแก้วที่ระดับต่ำกว่าอุณหภูมิ เสมือนแก้ว พอลิเมอร์หลายชนิด เช่น แอซีทัลไนลอน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิพรพิลีน จัดอยู่ใน กลุ่มของพอลิเมอร์ ที่มีผลึกแม้ว่าจะมีระดับการเกิดผลึกอยู่ในช่วงปานกลางก็ตาม

### 2.2.2.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติก (Mechanical Properties of Thermoplastics)

เทอร์โมพลาสติกโดยทั่วไปแสดงลักษณะพฤติกรรมแบบนอนนิวโทเนียน (non-newtonian และ ยืดหยุ่นหนืด (viscoelasticity) พฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหนืดหมายถึง การให้แรงกระทำกับเทอร์โมพลาสติก แล้วเกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร โดยกลไกของพฤติกรรมแบบนี้จะเป็น ลักษณะการ เคลื่อนตัวของสายโซ่ที่สัมพันธ์กับสายโซ่อื่นๆ เมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำ เทอร์โมพลาสติกมีลักษณะการเปลี่ยน รูปร่างซับซ้อน กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างจะขึ้นอยู่กับเวลาและอัตราของโหลด ที่มากระทำ ดังรูปที่ 2.4

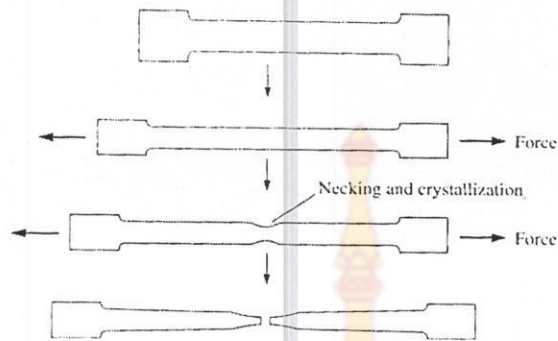


รูปที่ 2.4 กราฟความเค้น - ความเครียดของไนลอน 6-6 [23]

**พฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic Behavior)** การเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นเป็นผลมาจากกาให้ ความเค้นแก่เทอร์โมพลาสติกแล้วพันธะโคเวเลนต์ในสายโซ่เกิดการดึงยืดและทำให้ผิดรูปร่าง ส่งผลให้สายโซ่ ยืดตัวยาวออกไปในลักษณะยืดหยุ่น เมื่อนำความเค้นออก สายโซ่ที่ผิดรูปร่างไปจะกลับคืนสู่สภาพเดิม อย่าง ทันทีทันใด พฤติกรรมแบบนี้เกิดขึ้นกับโลหะและเซรามิกเช่นกัน เมื่อพันธะโลหะ ไอออนิกและ โคเวเลนต์ถูกดึง ให้เปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่น อย่างไรก็ตาม เมื่อนำความเค้นออกแล้ว ส่วนของสายโซ่ทั้งหมดอาจจะผิดรูปร่าง ไปบ้าง การกลับคืนสู่สภาพเดิมอาจจะเกิดขึ้นได้หลังจากเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นหนึ่งชั่วโมงหรือ หนึ่งเดือน โดยช่วงเวลาที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างขึ้นอยู่กับพฤติกรรม ยืดหยุ่นหนืดซึ่งมีส่วนทำให้เกิด พฤติกรรมยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรง

**พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Plastic Behavior of Amorphous Thermoplastics)** พอลิเมอร์กลุ่มนี้จะเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวรเมื่อมีความเค้นเกินระดับ ความเค้นจุดครากเข้ามากระทำ ซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนรูปร่างในวัสดุโลหะซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ ดิสโลเคชัน เคลื่อนที่ ในทางกลับกันพอลิเมอร์จะเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวรเมื่อสายโซ่ถูกดึงให้ยืดตัว ทำให้หมุ่น ทำให้ เคลื่อนที่หรือเกิดการคลายตัวด้วยแรงที่มากระทำ ในจังหวะเริ่มต้นของการให้แรงกระทำ สายโซ่อาจจะสานกัน หรือพันกันอย่างยุ่งเหยิง เมื่อระดับความเค้นเพิ่มสูงขึ้น สายโซ่จะคลายตัวและอยู่ในลักษณะตรง คอคอดจะ เกิดขึ้นและสายโซ่ยังคงเคลื่อนตัวด้วยความเค้นเพียงเล็กน้อย สายโซ่จะอยู่ในแนวขนานและอยู่ชิดกัน พันธะ

แวนเดอวาลส์ระหว่างสายโซ่จะเพิ่มขึ้นและต้องใช้ความเค้นที่สูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวร และเกิดความเสียหาย การจัดเรียงตัว แบบนี้จะทำให้เกิดผลึกในพอลิเมอร์ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในการผลิต ไนลอนให้เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง



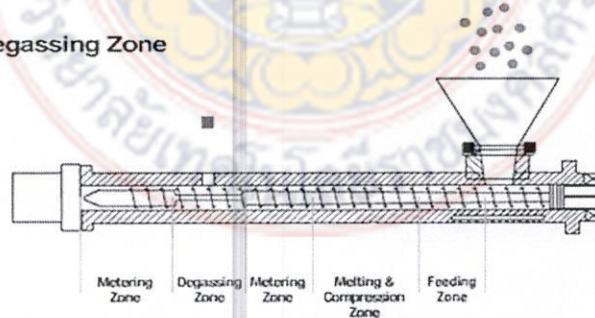
รูปที่ 2.5 การเกิดคอขวดในพอลิเมอร์ออสฐานจะไม่คงที่เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในตำแหน่งที่เกิดการ คอขวดซึ่งส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและอัตราการเปลี่ยนรูปร่างจะลดลง [25]

### 2.2.3 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์

กรรมวิธีการขึ้นรูปพอลิเมอร์นั้นมีมากมายหลายวิธี การเลือกใช้กรรมวิธีใดขึ้นอยู่กับธรรมชาติของ พอลิเมอร์ว่าเป็นเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตติง วิธีการผลิตเทอร์โมพลาสติกนั้นโดยส่วนมากจะอาศัย ความร้อนทำให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะอ่อนตัวหรือหลอมเหลวจึงทำการขึ้นรูป อีลาสโตเมอร์ก็มีวิธีที่คล้ายๆ กัน ส่วนเทอร์โมเซตติงนั้นมีวิธีการขึ้นรูปไม่หลากหลายนัก ทั้งนี้เพราะข้อจำกัดเรื่องกระบวนการเกิดการเชื่อมขวาง ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่จะเกิดขึ้นได้เพียงครั้งเดียว

การขึ้นรูปโดยการอัดรีด (Extrusion) เป็นการขึ้นรูปโดยอาศัยแรงดันจากสกรูดันพลาสติกที่มี สภาพหลอมเหลวผ่านแม่พิมพ์โลหะ จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความยาวต่อเนื่อง นิยมใช้ ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีภาคตัด แบบคงที่ ไม่ว่าจะเป็นรูปทรงเหลี่ยม กลม ท่อ เส้นใย หรือเป็นแผ่นก็ได้ วิธีการนี้จะขึ้นรูปได้รวดเร็วและ ปริมาณมาก บางครั้งสามารถสร้างเทคนิคพิเศษเพื่อผลิตพลาสติกต่างชนิดกันมากกว่า 2 ชนิดที่มีสีส่นต่างกัน ไปพร้อมกันได้ เครื่องอัดรีดแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.5

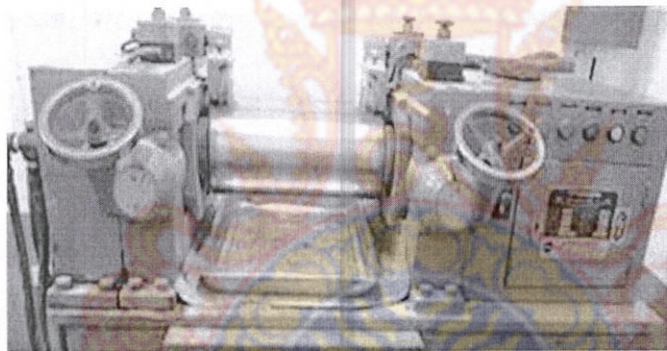
Extruder with Degassing Zone



รูปที่ 2.6 เครื่องอัดรีดหรือแบบต่อเนื่อง [25]

การคอมพาวด์เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับพลาสติก โดยพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอม จากนั้นสารเติมแต่งและพลาสติกหลอมจะถูกนวดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เทคนิคการคอมพาวด์พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น การคอมพาวด์แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Compounding) และการคอมพาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous Compounding)

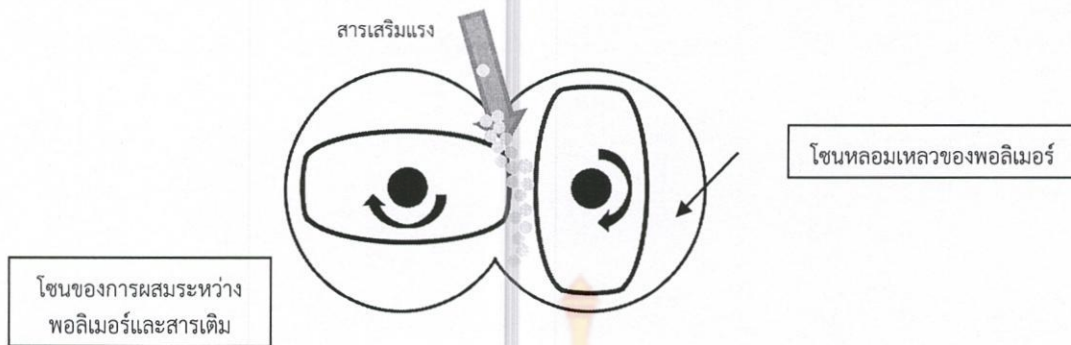
การคอมพาวด์แบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบชุด (Batch Compounding) ตัวอย่างเช่น เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill Mixer) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูกซึ่งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่นในขณะที่ทำการผสมจะมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกผ่านผิวลูกกลิ้งทั้งสอง โดยความร้อนของลูกกลิ้งมาจากชุดให้ความร้อนไฟฟ้าหรือการไหลเวียนของน้ำร้อนหรือน้ำมันร้อนผ่านภายในลูกกลิ้ง ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของสารเติมแต่งและพลาสติกได้ สามารถทำการผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้ สะดวกในการทำความสะอาด รวมทั้งการผสมแบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะแผ่น ซึ่งเหมาะสำหรับการแปรรูปต่อโดยบางเทคนิค เช่น การอัด (Compression Molding) สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ผู้ปฏิบัติต้องมีทักษะในการใช้เครื่องและมีความรู้เกี่ยวกับการคอมพาวด์สูง ต้องมีการช่วยผสมโดยการปาดพลาสติกให้เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างลูกกลิ้งเสมอ ความสม่ำเสมอในการผสมแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำ และเกิดการสูญเสียสารเคมีหรือการปนเปื้อนได้ง่าย เนื่องจากเป็นการผสมในระบบเปิดแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง

เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วย โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้งจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียนโรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก จึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ใช้เวลาในการผสมสั้น ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ทำให้อัตราส่วนในการผสมความสม่ำเสมอ การผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้ การทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก และการผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมโดยกระบวนการพอลิเมอร์คอมพาวด์ เวลาการผสม อัตราการป้อนของพอลิเมอร์และสารเติม เป็นต้น





รูปที่ 2.8 แสดงการผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมโดยกระบวนการพอลิเมอร์คอมปาว [7]

การเตรียมพลาสติกเพื่อทำการผลิต ในเทคนิคการทำงานพลาสติก หมายถึง ขั้นตอนที่สำคัญในการเตรียมพลาสติกซึ่งอยู่ในลักษณะวัตถุดิบให้พร้อมที่จะนำมาผลิตเป็นชิ้นงานได้ ซึ่งประกอบด้วยการย่อย (ทำเป็นเม็ด) ผสมในขณะที่เป็นของแข็ง และผสมขณะที่เป็นของเหลว น้อยครั้งที่จะมีการนำเอาพลาสติกที่ออกมาจากถังปฏิริยามาทำงานหรือนำมาใช้ได้ทันที โดยปกติจะต้องนำมาผสมกับสารเสริมสมบัติต่างๆ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทางเทคนิคที่มีคุณสมบัติต่างๆ ตามต้องการมีกรรมวิธีเตรียมพลาสติกหลายอย่างที่ยวมอยู่กับกระบวนการผลิตสารพลาสติกโดยตรง

การผลิตเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยกรรมวิธีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerisation) ผลผลิตที่ออกมาส่วนใหญ่จะเป็นผง ซึ่งยากแก่การนำไปผลิตได้ทันที จึงได้มีการทำให้เป็นเม็ดเพื่อให้สามารถนำไปเข้ากระบวนการผลิตชิ้นงานได้ง่าย ซึ่งโดยปกติบริษัทที่มีผู้ผลิตพลาสติกจะเป็นผู้เตรียมการขั้นตอนต่างๆนี้ออกมาจำหน่าย ส่วน พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) นั้นมีข้อยกเว้นเพราะสามารถปรับปรุงให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้มาก โดยการเติมส่วนผสมต่างๆ และวัสดุเสริมเข้าไป ซึ่งจะเป็นการประหยัดถ้าบริษัทผู้ผลิตผลิตผลิตภัณฑ์จาก PVC มากกว่า 30 ตัน/เดือน จะมีเครื่องเตรียมพลาสติกของตัวเอง ส่วนผสมของ PVC จะประกอบด้วย PVC ชนิดอื่นที่ได้มาจากกรรมวิธี (Polymerisation) ต่างๆ ซึ่งผสมสารป้องกันแสงและความร้อน (Light and Heat Stabiliser) สารหล่อลื่นภายนอกและภายใน สารทำให้อ่อน (Softener) สี และสารเสริม การเตรียมสารผสมก็เช่นเดียวกัน บริษัทผู้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกหลายบริษัทจะเตรียมเอง หน้าที่ที่สำคัญของการเตรียมพลาสติกก็คือ การเติมสารเสริมในปริมาณตั้งแต่ 0.01 ถึง 50% ของพลาสติก และผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันโดยปกติแล้วจะแยกกันว่าในการผสมแห้งเรียกว่า การผสม แต่ถ้าเป็นการผสมในขณะที่พลาสติกเหลวเรียกว่า การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenising) เพื่อให้การผสมในสภาพแห้งง่ายขึ้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่เป็นผงละเอียดผสมกับสารผสม จะเห็นได้ว่าในการผสมพลาสติกสองสามชนิดจะมีเครื่องย่อยไว้ก่อนหน้าเครื่องผสมด้วยเสมอ

ความหมายของการย่อย หมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยกลวิธีในการย่อยจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็กแตกต่างกันตามความต้องการ โดยจะต้องมีการแยกพลาสติกเม็ดประเภทหยาบออกจากเม็ดละเอียด เพื่อให้การทำงานขั้นต่อไปสะดวกยิ่งขึ้นจึงต้องมีการกรองประกอบเข้าไปด้วย เหตุผลที่สำคัญ เช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสม ทำให้อบแห้งได้ดี บ้อนเข้าเครื่องได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายได้เร็ว เป็นต้น เครื่องย่อยมีหลายชนิด ซึ่งสร้างไว้ให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก ตัวอย่างเครื่องย่อยที่ควรรู้จัก คือ เครื่องรีย่อย โมตี โมกวน โมตัต โมแท่งตี และโมรีต เครื่องรีย่อยจะใช้สำหรับการย่อย

พลาสติกแข็งเปราะได้เท่านั้น สำหรับการย่อยจะต้องใช้โม่บด ในการที่จะเลือกใช้โม่ชนิดใดๆ ขึ้นอยู่กับว่า ต้องการความละเอียด หรือความสม่ำเสมอของเม็ดพลาสติกขนาดไหน ดังรูปที่ 2.9

เครื่อง สภาพ ของพลาสติก	เครื่องรีย่อย	โม่ตี	โม่อัด	โม่แท่งตี
เปราะ				
เหนียว				
elastic				
เหมาะสำหรับ	PS, PF	PS, PF, PMMA	PVC, PE, PP, PA	

รูปที่ 2.9 การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยกลวิธีในการย่อย [25]

การผสม คือ เป็นการนำวัสดุต่างชนิดมารวมกันและให้เฉลี่ยเข้ากัน โดยการใช้วัสดุเคลื่อนที่ คลุกเคล้ากันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการ โดยการหมุนใบกวนในถังเปิดหรือปิดจะทำให้สารกระแทกและเสียดสีกัน เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งจะผสมเข้ากันดี ซึ่งจะมีเครื่องผสมแบบต่างๆ ที่เหมาะสำหรับชนิด และขนาดของพลาสติก ดังรูปที่ 2.10

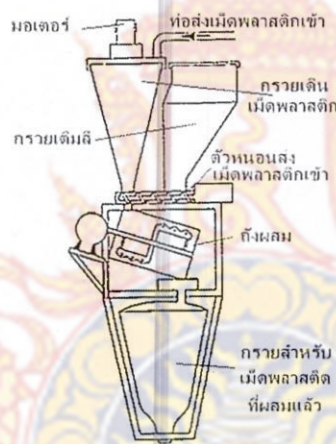
กรรมวิธีของ เครื่องผสม	ทำงานไม่ต่อเนื่อง						ต่อเนื่อง
	ถังกวน	ถังหมุน แกว่ง	ใบผสม	เข้าพียง กระจาย	นวดผสม	รูดผสม	
♦ วัสดุดิบ • สารเติม							
ผง	♦						
♦							
หนักมาก	♦						
♦							
หนักน้อย	♦						
♦							
เหมาะสำหรับ	PVC, UP	PS, PE, PP, PMMA	PVC, แข็ง และอ่อน	PVC, แข็ง และอ่อน	PVC	PE, PVC	เทอร์โมพลาสติกทั้งหมด

รูปที่ 2.10 เครื่องผสมแบบต่างๆ [25]

ในการผลิตพลาสติกเหลวหรือเหนียว เช่น PVC หลอด จะต้องใช้เครื่องกวน โดยปกติแล้วเครื่องผสมแบบนี้จะเป็นถังทรงกระบอก และใบพัดกวนที่ยกขึ้นลงได้ในแนวตั้ง ซึ่งถ้านี้จะเป็นสองชั้นใช้สำหรับให้ความร้อนหรือหล่อเย็นได้ตามต้องการ บางครั้งมีความจำเป็นที่ต้องผสมพลาสติกเหลวที่มีความหนืดสูงที่ยอมให้มีอากาศผสมอยู่ได้เพียงเล็กน้อย จะต้องมีการดูดอากาศออก แบบนี้จะต้องเป็นเครื่องผสมแบบปิดที่มีเกจัน

วัดความดันและข้อต่อสำหรับปั๊มสุญญากาศติดเอาไว้ เครื่องผสมที่เหมาะสมเป็นพิเศษสำหรับการผสมพลาสติกที่มีขนาดต่างๆ กัน เช่น เม็ดพลาสติกที่ผสมกับผง สารหล่อลื่น สี สารนำร่อง ก็คือ เครื่องผสมแบบตกอิสระในระหว่างที่เม็ดพลาสติกเสียดสีกันจะมีประจุไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้น ทำให้ดูดฝุ่นของสารผสมติดที่ผิวของเม็ดได้ดี เพื่อให้ได้การผสมที่ดีจะใช้ความเร็วรอบระหว่าง 25 ถึง 35 รอบต่อนาที ในบรรดาเครื่องผสมหลายแบบนี้ เครื่องผสมแบบทรงกรวยคู่ และแบบถังเอียงเอียงศูนย์เป็นที่รู้จักกันมากที่สุด การย้อมสีเม็ดพลาสติกในปัจจุบันหันมาใช้เครื่องผสมสี ซึ่งทำเป็นกรวยต่อไว้กับเครื่องผลิตชิ้นงานพลาสติกโดยตรง

เครื่องนี้ประกอบด้วย อุปกรณ์กับปริมาตรและเครื่องผสมและเนื่องจากการทำงานตามจังหวะเวลา เช่น การกะเกณฑ์ การส่งเข้าไปในห้องผสม ผสมและปล่อยออกจากห้องผสม เป็นต้น จะสามารถประกอบเครื่องผสมแบบนี้เข้ากับเครื่องผลิตชิ้นงานได้ทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเครื่องฉีดและเครื่องอัดผ่านเกลียว Extrusion เครื่องผสมแบบใบตีผสม ซึ่งมีหลายแบบเช่นเดียวกัน ประกอบด้วยถังทรงกระบอกวางในแนวขนานและมีเครื่องผสมซึ่งมีแกนขนานกับแกนของถังประกอบหมุนอยู่ภายในด้วยความเร็วรอบจนถึง 50 รอบต่อนาที เครื่องมือผสมอาจจะเป็นใบพัดแผ่นบิดเป็นเกลียว หรือเหมือนใบผานไถ ถังส่วนใหญ่จะเป็นสองชั้น เพื่อสำหรับให้ความร้อนและหล่อเย็นโดยปกติจะใช้ผสมสารพลาสติกที่เป็นฝุ่นที่จะต้องเติมสารที่เป็นของเหลวลงไปด้วย

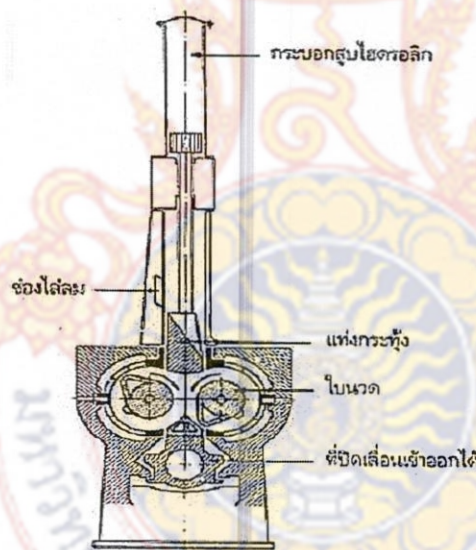


รูปที่ 2.11 เครื่องผสมแบบใบตีผสม [25]

ในการเตรียมพลาสติกที่เป็นฝุ่นในงานอุตสาหกรรมพลาสติกนั้น ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องผสมแบบตีฟุ้ง (Swirl Mixer) หมุนเร็วควบคู่ไปกับเครื่องผสมเย็น (Cold Mixer) ซึ่งเรียกว่า Heat & Cold Mixer ในถังตั้งจะมีเพลาสอดขึ้นจากกันถึงสำหรับประกอบเครื่องผสม เครื่องผสมมีหลายชั้น และตอนติดกับกันถึงจะมีใบผสมประกอบอยู่ ซึ่งระหว่างทำการผสมจะครอบคลุมพื้นถึงทั้งหมดที่ปลายบนสุดของเพลาสอดมากจะมีใบผสมที่เล็กกว่าติดอยู่ ความเร็วรอบของปลายใบผสมประมาณ 40 เมตรต่อวินาทีจะทำให้ของผสมเคลื่อนไหวราวกับเป็นของเหลว เพื่อชะลอความเร็วของการหมุนเวียนของผงพลาสติก จะสอดแผ่นชะลอความเร็วเอาไว้ในบริเวณที่ส่วนผสมอยู่ ฝุ่นละเอียดๆ ของพลาสติกที่มีความเร็วสูงจะกระทบกันทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากการเสียดสีขึ้นอย่างมาก และอาจจะให้ความร้อนเพิ่มเติมจากภายนอกแล้วแต่ความต้องการซึ่งจะสามารถปรับได้อีกซึ่งจะสามารถปรับได้ถึง 140°C เครื่องผสมแบบตีฟุ้งตอนบนจะมีฝาที่เปิดได้สำหรับเติมสารพลาสติก ในทางปฏิบัติจะมีท่อต่อไปยังเครื่องเติมอัตโนมัติที่ฝาปิดทางปล่อยออกจะอยู่ทางด้านข้างตอนล่างและมีท่อต่อให้ผง

พลาสติกลงไปเข้าถึงผสมเย็น ซึ่งอยู่ข้างล่างของผสมร้อนจะเย็นตัวลงในถังผสมเย็นนี้เหลือประมาณ 35°C เครื่องผสมเย็นจะมีปริมาตรโตกว่าและมีส่วนพิเศษเพิ่มเติม คือ มีแหวนหล่อเย็นหมุนหรือมีแผ่นหล่อเย็นอยู่ในถังช่วยในการหล่อเย็นเพิ่มเติม สิ่งนี้มีความจำเป็นเพื่อให้สามารถทำการผสมเย็นและผสมร้อนในจังหวะงานเดียวกันได้ ระยะเวลาผสมนั้นสั้นมาก คือ ประมาณ นาทีต่อครั้ง ขนาดของเครื่องผสมร้อนต่างๆ ไปจะอยู่ระหว่าง 1,000 - 1,500 ลิตร และเครื่องผสมเย็นประมาณ 2,000 - 3,000 ลิตร ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องผสมแบบนี้สำหรับการผสมผง PVC แห้ง (Dry Blends) แต่ก็สามารถเติมส่วนผสมที่เป็นของเหลวลงไปได้ เช่น ผสม Softener การให้ความร้อนแก่ PVC อ่อน จะได้ส่วนผสมแห้งหรือรวมกันเป็นก้อน

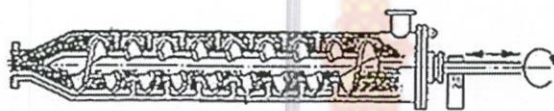
ในการทำพลาสติกไซดซ์ซิงค์ (Plasticising) ผงพลาสติกที่ผสมไว้แล้วจะถูกหลอมเหลวและผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันต่อไปอีก ควรจะแยกกันให้ชัดเจนก่อนระหว่างเครื่องนวดและรีดแบบทำงานไม่ต่อเนื่อง ซึ่งปกติใช้ในการผลิตพลาสติกแผ่นบางโดยการรีดแผ่น (Calendering) กับเครื่องผสมแบบต่อเนื่อง (Plasticising) เป็นการทำงานต่อเนื่อง โดยเครื่องนวด (Kneader) ประกอบด้วยเรือนทรงกระบอกวางอยู่ในแนวนอน และมีใบนวดรูปตัว Z สองใบหมุนสวนทางกันอยู่ภายในเครื่องนวดภายใน ใบจะประกอบพอดีอยู่เรือนภายใน แห่ง กระทั่งจะกดพลาสติกซึ่งอยู่ในปล่องช่วงบน ซึ่งสามารถให้ความร้อนได้ การเอาพลาสติกออกจากเครื่องนวดทำได้โดยการเลื่อนแผ่นปิดด้านล่าง ซึ่งสามารถเลื่อนเข้าออกได้ เนื่องจากเครื่องนวดแบบนี้ต้องใช้กำลังมาก จึงสามารถสร้างได้ขนาดปริมาตรภายในไม่เกิน 300 ลิตร ส่วนใหญ่จะใช้ในการผสมพลาสติกที่ต้องการเติมสารผสมมากๆ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เครื่องผสมแบบปิด [25]

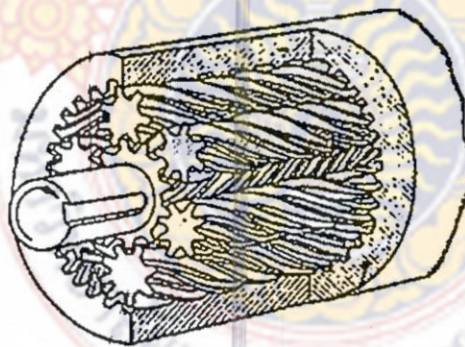
เครื่องรีดผสม จะใช้ต่อเมื่อต้องการทำการผสมอย่างเดี่ยว และต้องใช้คนควบคุมการทำงานตลอดเวลา การรีดจะเกิดขึ้นภายในร่องรีดของลูกรีดร้อนสองลูกซึ่งมีแกนขนานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 300 ถึง 500 มิลลิเมตรและความยาวระหว่าง 800 ถึง 1,500 มิลลิเมตร หมุนสวนทางกันด้วยความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย เพื่อให้การผสมดียิ่งขึ้นจะต้องมีคนคอยปาดส่วนของพลาสติกที่วิ่งออกทางด้านข้างให้เข้าไปอยู่ตรงกลางของลูกรีดร้อนเสมอ สำหรับการผสม PVC คุณภาพสูงแล้วยังไม่มีเครื่องใดดีกว่าเครื่องรีดผสมแบบนี้ ในการผลิตพลาสติกและพลาสติกที่จะนำไปรีดแผ่นเป็นแผ่นปกติจะใช้เครื่องผสมแบบต่อเนื่อง ในการนี้จะต้องใช้ชุดเกลียวหนอนโดยปกติจะใช้เกลียวหนอนแบบมีหลายตัว เช่น แบบตัวหนอน (Double

Worm) ที่มีเกลียวเป็นช่องทวิ ผงพลาสติกจะถูกรีดไปในร่องเกลียวเป็นคลื่นไปตามยาวของหนอน ซึ่งรับแรงขับมาจากระบบแมคคาณิก ทำให้เกิดการนวดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenising) สำหรับการเตรียมพลาสติกโดยทั่วๆ ไปจะใช้แบบตัวหนอนคู่ที่มีส่วนที่ทำหน้าที่ผสม และส่วนที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนใหญ่จะมีแผ่นนวดหรือใบนวดประกอบเอาไว้ ซึ่งจะเป็นตัวกะเกณฑ์ปริมาณผงพลาสติกให้เข้าไปในตัวหนอนให้พอดีด้วย เครื่องผสมแบบต่อเนื่อง แบบตัวหนอนตัวเดียวออกแบบสร้างให้เหมาะสมสามารถผสมและหลอมพลาสติกได้ดีเช่นกัน ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเรียกว่า เครื่องนวดผสม (Co-Kneader) แบบนี้นอกจากจะหมุนส่งพลาสติกไปข้างหน้าแล้ว ยังมีการสั่นพลาตัวหนอนไปพร้อมๆ กันด้วยแผ่นเกลียวของตัวหนอนจะทำให้เป็นร่องไว้สองร่องขนานกับแกนเพลลา เพื่อไม่ให้กระทบกับพื้นนวดขณะหมุนซึ่งติดอยู่กับเรือนภายในของทรงกระบอกของการผสมและการนวดจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงตัดเฉือนและการเคลื่อนตัวไปทุกทิศทุกทางของส่วนผสม การเติมสารพลาสติกกลงไปในเครื่องนวดผสมจะได้รับการพาเข้าของเกลียวหนอนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.13 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน [25]

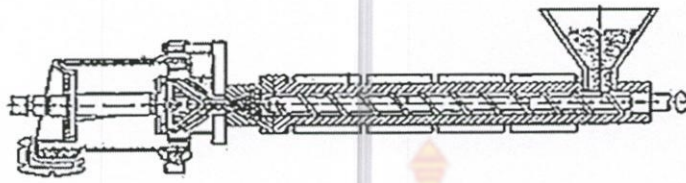
ในกรรมวิธีการเตรียมพลาสติกนั้นยังมีเครื่อง Extrusion แบบเกลียวหนอนหลายตัว (Planet-Extruder) อีกแบบหนึ่งที่ใช้กันมาก โดยตรงกลางเป็นเกลียวใหญ่และจะมีเกลียวเล็กๆ อยู่รอบๆ หลายตัวรวมกันอยู่ในเรือนทรงกระบอก เนื่องจากมีพื้นเกลียวเลื้อยขบกันอยู่จะทำให้เกิดการรีดขึ้นระหว่างพื้นเกลียว ลักษณะการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดจากการบดกันของร่องฟันหลายร่องทำให้ส่วนผสมถูกรี๊ดให้บางเข้ากันดี และจะมีสกรูส่งอยู่ด้านหน้าส่งพลาสติกเหลวออกไปยังหัวฉีด ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนหลายตัว [15]

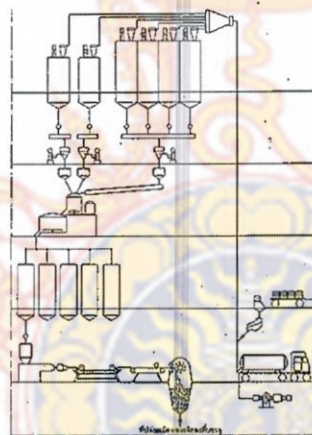
การผลิตพลาสติกเม็ดใช้วิธีการแตกต่าง 2 วิธีการ คือ การทำเม็ดร้อน (Hot Granulating) กับการทำเม็ดเย็น (Cold Granulating) การทำเม็ดร้อน ดังรูปที่ 2.15 ทำโดยการเอาหัววัดหลายรูมาติดไว้ที่หน้าเครื่อง Plasticising เพื่อให้พลาสติกเหลวไหลผ่านช่องออกมาจากช่องและจะมีเม็ดหมุนติดอยู่ข้างหน้าเพื่อหมุนตัดให้เป็นเม็ดสั้นๆ รอบๆ หัวฉีดและเม็ดจะมีเรือนหุ้มอยู่เพื่อหล่อเย็นเม็ดพลาสติก โดยการเป่าลมเย็นหรือมีวง

แหวนน้ำหล่อเย็นอยู่เพื่อรับเม็ดพลาสติก สำหรับเม็ดพลาสติกที่ตัดง่าย เช่น LDPE ก็จะไม่ปล่อยให้ตกลงในน้ำเสร็จแล้วจึงนำเม็ดพลาสติกลงไปอบแห้ง หรือไล่น้ำออกแล้วจึงนำไปเก็บไว้ในไซโล



รูปที่ 2.15 เครื่องทำพลาสติกแบบร้อน [25]

เนื่องจากเม็ดพลาสติกที่ตกลงมายังร้อนอยู่จะฟอร์มตัวเป็นเม็ดกลมหรือเม็ดรีตได้ในการผลิตเม็ดพลาสติกทรงกระบอกจะทำได้โดยการปล่อยให้พลาสติกที่ผ่านรูหลายๆ รูออกมานั้น ผ่านไปยังอ่างน้ำทำให้เย็นเสียก่อนแล้วใช้เครื่องดึงไปผ่านเครื่องทำเม็ด คือ ไปผ่านมีดหมุนตัด ซึ่งมีความยาวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร กรรมวิธีนี้เรียกว่า การทำเม็ดเย็น สำหรับการเตรียมพลาสติกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้น มีเครื่องอยู่หลายแบบขายตามท้องตลาดแต่แนวโน้มที่จะหันมาใช้เครื่องอัตโนมัติมีมากขึ้น เนื่องจากประหยัดกว่า และได้คุณภาพที่สม่ำเสมอ เครื่องพลาสติกแบบอัตโนมัติ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เครื่องพลาสติกแบบอัตโนมัติ [25]

#### 2.2.4 สมบัติการนำไฟฟ้า [23-25]

ความสามารถของวัสดุในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า หรือส่วนกลับของมันเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน การแบ่งชนิดของวัสดุตามลักษณะการนำไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ โลหะ วัสดุกึ่งตัวนำและฉนวน สำหรับวัสดุส่วนใหญ่กระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกแรงภายใต้อิเล็กตรอนอิสระขึ้นอยู่กับโครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุ แถบพลังงานคือ ระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ต่อเนื่องกันและชิดกันมาก อาจเกิดแถบพลังงานขึ้นสำหรับแต่ละระดับพลังงานย่อยที่พบในอะตอม 1 ตัว ความหมายของโครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนคือ การที่แถบรอบนอกถูกจัดเรียงแล้วเข้าอยู่โดยอิเล็กตรอน วัสดุโลหะ วัสดุกึ่งตัวนำ และวัสดุฉนวนมีโครงสร้างแถบที่ต่างกันอิเล็กตรอนจะเป็นอิสระ หากได้รับการกระตุ้นให้ออกจากพลังงานที่มันอยู่ไปในชั้นพลังงานสูงกว่าพลังงานเฟอร์มิที่ยังว่างอยู่ การกระตุ้นอิเล็กตรอนในโลหะใช้พลังงาน

น้อย จึงเกิดอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากวัสดุกึ่งตัวนำ และฉนวนต้องใช้พลังงานปริมาณมากกว่าในการกระตุ้น อิเล็กตรอน ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระน้อย และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าที่ต่ำ อิเล็กตรอนอิสระที่ เคลื่อนตัวภายใต้สนามไฟฟ้าจะถูกกระเจิงโดยตาหนิและความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก ค่าสภาพเคลื่อนที่ บ่งชี้ถึงความถี่ของการกระเจิงที่เกิดขึ้น ในวัสดุหลายประเภทค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าแปรผันตรงกับความ เข้มข้นของอิเล็กตรอนและสภาพการเคลื่อนที่ของมันเป็นสำหรับวัสดุโลหะ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่ม ขึ้นกับอุณหภูมิ ปริมาณสารเจือปน และการแปรรูปถาวร โดยเป็นผลรวมจากแต่ละกรณี

#### - สมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์

วัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี เนื่องจากไม่มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากเป็นพาหะใน การนำไฟฟ้า กลไกการนำไฟฟ้าของวัสดุประเภทนี้ไม่กระจ่ายชัด สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงการนำ ไฟฟ้าคิดว่าน่าจะเกิดจากอิเล็กตรอน

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ชนิดที่มีความนำไฟฟ้าเท่าเทียมกับโลหะ วัสดุ ประเภทนี้เรียกว่าเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) พอลิเมอร์บางชนิดมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด ถึง  $1.5 \times 10^{-7} (\Omega - m)^{-1}$  โดยคิดต่อหน่วยปริมาตรจะประมาณหนึ่งส่วนของทองแดง แต่หากคิดต่อหน่วย น้ำหนักจะได้ค่าการนำที่มีค่าประมาณสองเท่าของทองแดง ตัวอย่างวัสดุประเภทนี้ เช่น พอลิอะเซทิลีน พอลิ พาราฟีนิลีน พอลิไพร์โรล และพอลิอะนิลีน ที่ถูกเจือด้วยสารเจือที่เหมาะสมดังในวัสดุกึ่งตัวนำประเภทนี้อาจ ทำให้เป็นชนิดเอ็นหรือพีได้แล้ว แต่ชนิดของสารเจือปน ข้อแตกต่างคือ อะตอมหรือโมเลกุลของสารเจือไม่ได้ เข้าแทนที่อะตอมในพอลิเมอร์ กลไกที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและหลุมในพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นซับซ้อน และยังไม่กระจ่ายชัด มีการอธิบายว่าอะตอมของสารเจือปนทำให้เกิดแถบพลังงานใหม่ที่ซ้อนทับกับทั้งแถบวาเลนซ์และแถบการนำของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ทำให้ได้แถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่บางส่วน และทำให้มี อิเล็กตรอนอิสระหรือหลุมเป็นจำนวนมากที่อุณหภูมิห้องการเรียงตัวของสายพอลิเมอร์ไม่ว่าจะเป็นเชิงกล หรือ เชิงแม่เหล็กในช่วงการสังเคราะห์ มีผลให้เกิดเป็นวัสดุแอนไอโซทรอปี่ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดตามทิศทางของ การเรียงตัว

พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีศักยภาพในการใช้งานหลายประเภทเนื่องจากมีค่าความหนาแน่นต่ำ บิดงอ ได้ และง่ายในการผลิต มีการใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ชาร์จไฟใหม่ได้ มีสมบัติหลายประการที่ดีกว่า แบบที่ใช้โลหะ การใช้งานที่เป็นไปได้ เช่น สายไฟในเครื่องบิน และส่วนประกอบของยานอวกาศสารเคลือบผิว บังกันการเกิดไฟฟ้าสถิตบนผ้า วัสดุกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ และไดโอด

#### - อุปกรณ์กึ่งตัวนำ (Semiconductor device)

สมบัติที่พิเศษเฉพาะของวัสดุกึ่งตัวนำทำให้เราสามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น ไดโอดและทรานซิสเตอร์ได้ถูกนำมาใช้แทนหลอดสุญญากาศ ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์กึ่งตัวนำ ( บางครั้งเรียกว่า อุปกรณ์โซลิดสเตท) คือ มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย และไม่ต้องเสียเวลาอุ่นเครื่อง วงจรไฟฟ้าขนาดจิ๋วประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากที่สร้างลงบนแผ่นซิลิคอน การค้นคิด อุปกรณ์กึ่งตัวนำไปสู่วงจรไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก เป็นเบื้องหลังของการเกิดอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เติบโต อย่างรวดเร็วในช่วงหลายปีที่ผ่านมา

#### - วัสดุกึ่งตัวนำในคอมพิวเตอร์

นอกจากจะสามารถขยายสัญญาณแล้ว ทรานซิสเตอร์และไดโอดยังใช้เป็นอุปกรณ์สวิตช์ สำหรับ กระบวนการคำนวณทางคณิตศาสตร์และตรรกวิทยา และในงานเก็บบรรจุข้อมูล เลขที่ใช้ในงานคอมพิวเตอร์เป็น เลขฐานสอง มี 2 สถานะ คือ เลข 1 และ 0 ทรานซิสเตอร์และไดโอดในวงจรดิจิทัลทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่มี 2

สถานะ คือ เปิดและปิด คือมีการนำและไม่มี การนำไฟฟ้า มีความเหมือนกันกับเลข 1 และเลข 0 ดังนั้นเลขฐานสองสามารถแทนด้วยวงจรที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ที่เปิดหรือปิด

- วงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ในช่วงสองสามปีที่ผ่านมาเกิดวิวัฒนาการทางงานอิเล็กทรอนิกส์ มีผลมาจากความก้าวหน้าทางวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถลดขนาดให้เล็กและประกอบด้วยองค์ประกอบนับล้าน วิวัฒนาการนี้ส่วนหนึ่งถูกกระตุ้นจากเทคโนโลยีทางอวกาศที่ต้องการ คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กและใช้พลังงานต่ำ จากผลของการพัฒนากระบวนการเทคนิควิธีการผลิต ทำให้ราคาของวงจรมีราคาต่ำลงส่งผลให้เครื่องคอมพิวเตอร์ราคาถูก สามารถซื้อหาได้ง่าย การใช้งานของวงจรรวม (integrated circuit) เข้ามามีบทบาทอย่างมากมาย เช่น เครื่องคิดเลข การสื่อสาร นาฬิกาข้อมือ เครื่องมือในงานอุตสาหกรรม และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

- การนำไฟฟ้าในเซรามิกประเภทไอออนิกและพอลิเมอร์

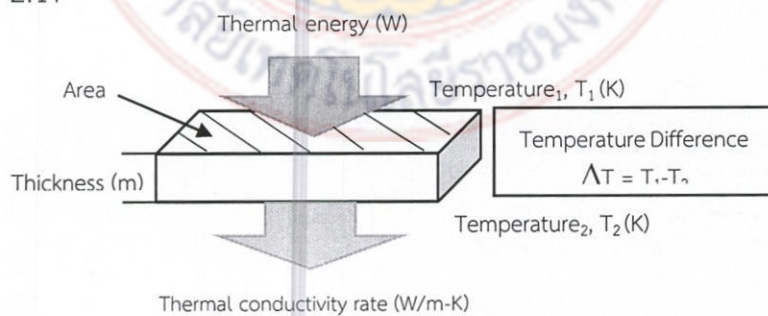
วัสดุพอลิเมอร์และเซรามิกประเภทไอออนิกส่วนใหญ่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง มีแถบพลังงานของอิเล็กตรอนที่คล้ายคลึงกับในรูปที่ 18.4c แถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและถูกกั้นจากแถบการนำที่ว่างโดยแถบต้องห้ามที่มีขนาดกว้างปกติจะกว้างกว่า 2 eV ดังนั้น ที่อุณหภูมิห้องจึงมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยมากที่ถูกกระตุ้นข้ามแถบต้องห้าม ทำให้วัสดุเหล่านี้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าที่ต่ำ ตารางที่ 18.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของวัสดุในกลุ่มนี้หลายชนิด การใช้งานโดยหลักของวัสดุกลุ่มนี้คือ เป็นฉนวนไฟฟ้าสมบัติที่ต้องการคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานสูง ที่อุณหภูมิสูงขึ้นวัสดุฉนวนจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าสูงขึ้น

2.2.5 สมบัติการนำความร้อน

การนำความร้อนคือปรากฏการณ์ที่ความร้อนถ่ายเทจากเนื้อวัสดุจากบริเวณที่มีความร้อนสูงสู่บริเวณที่อุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุคือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) นิยามในรูปสมการ

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

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 หลักการคำนวณหาการนำความร้อนแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การคำนวณการนำความร้อนในวัสดุ



โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมากเพราะมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากทำให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ค่าความนำความร้อนของโลหะมีค่าระหว่าง 20-400 W/m-K เซรามิกมีสมบัติเป็นฉนวนเพราะขาดอิเล็กตรอนอิสระแต่โฟนอนจะทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนแต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ค่าความนำความร้อนสำหรับวัสดุเซรามิกจะอยู่ระหว่าง 2-150 W/m-K สำหรับวัสดุประเภทพอลิเมอร์การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการสั่นและการหมุนโซ่โมเลกุล ขนาดของค่าความนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณความเป็นผลึก ซึ่งค่าความนำความร้อนของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ประมาณ 0.3 W/m-K

เมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้วัสดุเกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้เกิดการความเสียหายและเกิดการเสียรูปอย่างถาวร

#### กลไกต่างๆของการนำความร้อน

ความร้อนถูกถ่ายเทในวัสดุของแข็งโดยคลื่นการสั่นของผลึก (โฟนอน) และอิเล็กตรอนอิสระ และความนำความร้อนทั้งหมดเป็นผลรวมของค่าความนำความร้อนของกลไกทั้งสอง หรือ

$$k = k_l + k_e \quad (3)$$

เมื่อ  $k_l$  และ  $k_e$  คือค่าความนำความร้อนเนื่องจากการสั่นของผลึกและเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระตามลำดับปกติค่าหนึ่งจะเด่นกว่าอีกค่าหนึ่ง พลังงานความร้อนตามกลไกโฟนอนหรือคลื่นผลึกถูกถ่ายเทในทิศทางเคลื่อนที่ของโฟนอน ค่า  $k_l$  เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโฟนอนจากบริเวณอุณหภูมิสูงสู่บริเวณอุณหภูมิต่ำซึ่งมีการกระจายค่าอุณหภูมิเกิดขึ้น

อิเล็กตรอนอิสระหรืออิเล็กตรอนตัวนำเกี่ยวข้องกับ การนำความร้อนทางไฟฟ้าโดยที่อิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่ร้อนของตัวอย่างได้รับพลังงานจลน์ ดังนั้น จึงเคลื่อนสู่บริเวณที่เย็นกว่า ซึ่งพลังงานจลน์บางส่วนถูกถ่ายเทไปสู่อะตอมเดียวกัน (ในรูปพลังงานการสั่น) โดยเป็นผลจากการชนกับโฟนอนหรือส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลของค่า  $k_e$  ต่อค่าความนำความร้อนทั้งหมด เพิ่มตามความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระเพราะมีอิเล็กตรอนอิสระที่ช่วยในการนำความร้อนเพิ่มขึ้น

#### โลหะ

ในโลหะบริสุทธิ์สูงกลไกการถ่ายเทความร้อนด้วยอิเล็กตรอนอิสระมีผลมากกว่ากลไกโฟนอน เพราะอิเล็กตรอนไม่ถูกระงับได้ง่าย ดังเช่นโฟนอนและความเร็วสูงกว่าโฟนอนอนอนจากนี้โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมากเพราะว่ามีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน ค่าความนำความร้อนของโลหะทั่วไปหลายชนิดแสดงในตารางที่ 19.1 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 20 และ 400 W/m-K

เพราะว่าอิเล็กตรอนอิสระเป็นตัวเกี่ยวข้องหลักทั้งการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนในโลหะบริสุทธิ์ การพิจารณาทางทฤษฎีชี้ว่าการนำทั้งสองแบบควรจะมีความสัมพันธ์กันดังกฎของ Wiedemann-Franz

$$L = \frac{k}{\sigma T} \quad (4)$$

ซึ่ง  $\sigma$  เป็นค่านำความไฟฟ้า  $T$  คือค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ และ  $L$  คือค่าคงที่ ค่า  $L$  ทางทฤษฎีเท่ากับ  $2.44 \times 10^{-8} \Omega - W / K^2$  ไม่ควรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและควรจะเป็นค่าคงที่สำหรับโลหะทุกชนิดถ้าพลังงานความร้อนถูกถ่ายเทด้วยอิเล็กตรอนทั้งหมด ค่า  $L$  จากการทดลองสำหรับโลหะต่างๆ รวบรวมอยู่ในตารางที่ 19.1 จะเห็นว่า ค่า  $L$  จากการทดลองและจากทฤษฎีใกล้เคียงกัน (ต่างกันไม่เกิน 2 เท่า) โลหะที่มีธาตุอื่นเจือปนจะส่งผลลดค่าความนำความร้อน ด้วยเหตุผลเดียวกันค่าความนำไฟฟ้าลดลง กล่าวคือ อะตอมของธาตุเจือปน โดยเฉพาะในรูปของสารละลายของแข็ง ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางกระจายลดประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของ

อิเล็กทรอนิกส์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำความร้อนกับส่วนผสมเคมีของโลหะผสมทองแดงสังกะสี (รูปที่ 19.4) แสดงผลนี้ เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมสูงค่อนข้างต้านทานการถ่ายเทความร้อน

#### เซรามิก

วัสดุที่ไม่ใช่โลหะเป็นฉนวนเพราะขาดอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก ดังนั้น โฟนอนจะทำหน้าที่นำความร้อนเป็นหลัก  $k_e$  มีค่าน้อยกว่า  $k_l$  มาก โฟนอนมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานความร้อนน้อยกว่าอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากโฟนอนที่มีประสิทธิภาพมากกระจายตัวด้วยความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก ค่าความนำความร้อนสำหรับวัสดุเซรามิกชนิดต่างๆรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.2 ค่าความนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงระยะ 2 ถึง 50 W/m-K แก้วและเซรามิกอสัณฐานอื่น ๆ มีค่าความนำความร้อนต่ำกว่าเซรามิกที่มีโครงสร้างผลึก เพราะว่าการกระเจิงโฟนอนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อโครงสร้างอะตอมไม่เป็นระเบียบและไม่สม่ำเสมอ

การกระเจิงของการสั่นผลึกจะมากตามการเพิ่มค่าอุณหภูมิ ดังนั้น ค่าความนำความร้อนของวัสดุเซรามิกส่วนใหญ่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ จะเห็นว่าค่าความนำความร้อนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี การส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสีอินฟราเรดจะเกิดมากโดยเฉพาะในวัสดุเซรามิกที่โปร่งใส ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ รุพูนในเซรามิกอาจจะมีผลทางลบต่อค่าความนำความร้อน ในสภาวะส่วนใหญ่การเพิ่มปริมาตรรุพูนจะส่งผลต่อการลดค่าความนำความร้อน ในความเป็นจริงเซรามิกทั้งหลายที่ใช้เป็นฉนวนความร้อนมีรุพูนผสมอยู่ปกติการถ่ายเทความร้อนผ่านรุพูนจะช้า และไม่มีประสิทธิภาพภายในรุพูนมีอากาศซึ่งมีค่าความนำความร้อนต่ำประมาณ 0.02 W/m-K นอกจากนี้การพาความร้อนโดยก๊าซในรุพูนค่อนข้างไม่มีประสิทธิภาพ

#### พอลิเมอร์

ค่าความนำความร้อนของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีค่าระดับ 0.3 W/m-K สำหรับวัสดุประเภทนี้มีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นโดยการสั่นและการหมุนของโซ่โมเลกุล ขนาดของค่าความนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณความเป็นผลึก พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงและโครงสร้างเป็นระเบียบจะมีความนำความร้อนมากกว่าพอลิเมอร์เดียวกันที่เป็นอสัณฐาน ทั้งนี้เนื่องจากการสั่นของโซ่โมเลกุลซึ่งเป็นระเบียบมากกว่าสำหรับสภาวะที่เป็นผลึก พอลิเมอร์มักถูกใช้งานเป็นฉนวนความร้อนเพราะว่าค่าความนำความร้อนต่ำ ดังเช่นเซรามิกคุณสมบัติการเป็นฉนวนอาจจะเพิ่มมากขึ้นโดยรุพูนเล็กๆ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเกิดโฟม (Foaming) ระหว่างกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน พอลิสไตรีนที่เป็นเกิดโฟม (Styrofoam) นิยมใช้เป็นภาชนะเครื่องดื่มและฉนวนกันความร้อน

ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติเชิงความร้อนสำหรับวัสดุต่างๆ [12]

ชนิดวัสดุ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity: $C_p$ ) (J/Kg-K)	ค่าความนำความร้อน(Thermal conductivity: $\lambda$ ) (W/m-K)
อะลูมิเนียม	900	247
ทองแดง	386	398
เงิน	235	428
อะลูมินา	775	39
อะลูมิเนียม ไนไตรต์	740	150
โบรอนไนไตรต์	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 ความหนืดและสมบัติการไหล [29-30]

เมื่อของไหล (Fluid) เกิดการไหล ความเร็วของการไหล (เมตร/วินาที) และอัตราการไหล (เมตร<sup>3</sup>/วินาที) ถูกควบคุมโดยความต้านทานภายใน (Internal resistance) ของของไหลนั้น ความต้านทานภายในของของไหลคือค่าความหนืด (Viscosity) ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถหาได้จากการใช้เครื่องมือวัดอื่นนอกจากค่าความหนืดแล้ว เครื่องรีโอมิเตอร์ยังใช้ในการวัดสมบัติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) เป็นต้น ความหนืดของวัสดุชนิดต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน ดังตัวอย่างแสดงดังในตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.3 พบว่าพลาสติกหลอมเป็นของไหลที่มีความหนืดอยู่ในช่วง  $10^2$ - $10^6$  ปาสคาล วินาที ของไหลชนิดนี้แสดงพฤติกรรมการไหลที่ซับซ้อนมาก กล่าวคือ ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงตามแฟคเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราเฉือน (Shear rate) เวลาที่ใช้ในการไหล อุณหภูมิ ความดัน และแรงกระทำจากภายนอก ในขณะที่ไหลพลาสติกหลอมสนองต่อสมบัติทั้งการไหลแบบเฉือน (Shear property) และการไหลแบบยืด (Extensional property) ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ มีทั้งการไหลหนืด (Viscous flow) ตอบสนองต่อความเค้นเฉือน (Shear stress) และการไหลแบบยืดตอบสนองต่อความเค้นยืด (Tensile stress หรือ Elongational stress หรือ Extensional stress)

ตารางที่ 2.3 ความหนืดของวัสดุชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุ	ความหนืด(ปาสคาล วินาที)	ลักษณะเนื้อสาร
อากาศ	$10^{-5}$	ก๊าซ
น้ำ	$10^{-3}$	ของเหลว
ลาเทกซ์พอลิเมอร์	$10^{-3}-10^{-2}$	ของเหลว
สี	$10^{-2}-10^{-1}$	เป็นครีม
น้ำมันมะกอก	$10^{-1}$	ของเหลว
กลีเซอรอล	10	ของเหลวค่อนข้างหนืด
เทอร์โมเซต (อีพอกซี)	50	หนืดคล้ายน้ำเชื่อม
พอลิยูรีเทนเหลว	$10^2-10^3$	หนืดคล้ายน้ำเชื่อม
พลาสติกหลอม	$10^2-10^6$	เหนียวหนืด
ยางดิบ	$10^2-10^6$	แข็งและยืดหยุ่น
ยางมะตอย	$10^9$	ของแข็งไหลได้
แก้ว	$10^{21}$	ของแข็ง

พอลิเมอร์หลอมเป็นวัสดุประเภทวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic material) กล่าวคือ มีทั้งลักษณะหนืด (viscous) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของของไหล (Fluid) และยืดหยุ่น (Elastic) ซึ่งเป็นสมบัติของของแข็งยืดหยุ่น ปริมาณหรือองค์ประกอบของความหนืดและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอมขึ้นอยู่กับสภาวะของการแปรรูป (เช่น อุณหภูมิ) ชนิดของพอลิเมอร์ พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขณะไหลในเครื่องแปรรูป

ภายใต้สภาวะของกระบวนการแปรรูปชนิดต่างๆ เช่น การฉีดเข้าเป้า (Injection molding) และการเอกซ์ทรูด (Extrusion) ซึ่งในขณะที่ไหลมีค่าอัตราเฉือน (Shear rate) สูงมาก การตอบสนองของพอลิเมอร์หลอมมีลักษณะเฉพาะ ดังนั้นมีความจำเป็นที่บุคลากรที่เกี่ยวข้องในวงการพอลิเมอร์ทั้งเป็นผู้แปรรูป ผู้ออกแบบเครื่องแปรรูป และนักเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ต้องมีความเข้าใจเรื่องสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอม ที่สภาวะต่างๆ ของการแปรรูป โดยความรู้เรื่องสมบัติการไหลทำให้บุคลากรเหล่านี้สามารถปฏิบัติงานในลักษณะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สรุปข้อดีของความรู้เรื่องสมบัติการไหลต่อบุคคลต่างๆ ดังนี้

1. ผู้แปรรูปพอลิเมอร์ (Polymer processor)
  - สามารถใช้เครื่องแปรรูปให้เหมาะกับชนิดและเกรดของพอลิเมอร์
  - ใช้สภาวะการแปรรูปที่เหมาะสมเพื่อการผลิตที่มีคุณภาพ
  - มีความสามารถในการใช้เครื่องมือชนิดใหม่ได้ตามเป้าหมาย
  - สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูปได้ เช่น ปัญหาการฉีดไม่เต็มเป้า และปัญหาการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน เป็นต้น
2. ผู้ออกแบบเครื่องแปรรูป
  - สามารถออกแบบเครื่องแปรรูปที่เหมาะสมกับรีโอโลยีของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้
  - สามารถออกแบบเป้าและดายที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่เหมาะสมกับชนิดผลิตภัณฑ์ และชนิดพอลิเมอร์
3. นักเทคโนโลยีพอลิเมอร์

- สามารถพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่หรือเกรดใหม่ให้เหมาะกับการแปรรูปในลักษณะต่างๆ
- สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของการผลิตและการแปรรูปพอลิเมอร์

### การแบ่งชนิดของของไหล

เพื่อพัฒนาความรู้ความเข้าใจเรื่อง สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมในกระบวนการแปรรูป มีความจำเป็นที่จะต้องเรียนรู้ ลักษณะการไหลของของไหลชนิดต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานต่อความเข้าใจเรื่อง พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอม โดยทั่วไป แบ่งชนิดของของไหลตามพฤติกรรมการไหลได้ 2 ชนิด คือ

#### ○ ของไหลอุดมคติหรือของไหลนิวทอนเนียน (Ideal or Newtonian Fluids)

พิจารณาการผิดรูปและการไหลของของไหลนิวทอนเนียนที่วางตัวอยู่ระหว่างแผ่นกระจกใสบาง 2 แผ่น ที่มีพื้นที่กว้างมาก (A) มีระยะห่างเป็น X เมตร

ใช้แรง F (นิวตัน) ซึ่งเป็นแรงคงที่ดึงแผ่นกระจกด้านบนด้วยความเร็ว V (เมตรต่อวินาที) ในขณะที่ให้กระแสน้ำอยู่กึ่งกลางที่สามารถคำนวณค่าความเค้นเฉือนได้ดังนี้

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} = \eta \dot{\gamma} \quad (5)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ความหนืดของของไหลนิวทอนเนียน (Newtonian viscosity) หน่วยเป็น ปาสคาล วินาที

$\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน (shear rate) มีหน่วยเป็นวินาที

F คือ แรงที่ใช้ดึงแผ่นกระจกด้านบน มีหน่วยเป็นนิวตัน

v คือ ค่าความเร็ว ของการเคลื่อนที่ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

$\tau$  คือ ความเค้นเฉือน (shear stress) มีหน่วยเป็นปาสคาล (นิวตันต่อตารางเมตร)

ดังนั้นในกรณีการไหลของของไหลนิวทอนเนียน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และ อัตราเฉือน จะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\tau \propto (dv/dx) \quad (6)$$

ค่าความหนืดเฉือนของของไหลนิวทอนเนียน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน หรือค่า  $\tan$  ของมุมของเส้นกราฟความเค้นเฉือนกระทำกับแกนของอัตราเฉือน ดังนี้

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \tan \alpha \quad (7)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ มุมที่เส้นกราฟของความหนืดทำมุมกับแกนของอัตราเฉือน

ดังนั้นจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหลนิวทอนเนียนจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงค่าของความหนืดของการไหลของของไหลนิวทอนเนียนคงที่ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนมักจะเรียกว่า เส้นกราฟของการไหล (Flow curve) ค่าความหนืดของของไหลนิวทอนเนียนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของของไหล ตัวอย่างของไหลในกลุ่มของของไหลนิวทอนเนียนส่วนใหญ่เป็นของไหลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำ น้ำมันพืช และตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น

### ○ ของไหลนอนนิวทอนเนียน (Non-Newtonian fluids)

ค่าความหนืดของของไหลนิวทอนเนียน มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนและไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการไหล แต่มีวัสดุหลายชนิดที่ไม่แสดงสมบัติการไหลทำนองเดียวกับของไหลนิวทอนเนียน กล่าวคือสมบัติการไหลมีการเบี่ยงเบนไปจากนี้ ตัวอย่างวัสดุเหล่านี้ เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ และน้ำยาง เป็นต้น เรียกของไหลในกลุ่มนี้ว่าเป็น ของไหลนอนนิวทอนเนียน ซึ่งมีสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือเส้นกราฟของการไหล (flow curve) ไม่เป็นเส้นตรงดังเช่นกรณีการไหลของของไหลนิวทอนเนียน และความหนืดของการไหลขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนและประวัติการถูกเฉือน (Shear history) ของไหลที่แสดงพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวทอนเนียน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

#### กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลไม่ขึ้นกับเวลา (Time-Independent Fluids)

นิยามทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายสมบัติการไหลของของไหลที่สมบัติการไหลไม่ขึ้นกับเวลา แสดงดังสมการ 2.4

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = \frac{\tau}{\eta} \quad (8)$$

ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน (flow curve) และระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือน (Viscosity curve) (ดูรูปที่ 2.4) ของไหลในกลุ่มนี้เปรียบเทียบกับของไหลนิวทอนเนียน พบว่าสามารถแบ่งพฤติกรรมการไหลตามชนิดของของไหลได้ 3 ประเภท คือ ของไหลบิงแฮม (Bingham fluid) ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) และ ของไหลไดแลทแทน (Dilatant fluid)

#### ○ การไหลของของไหลบิงแฮม (Bingham Fluid)

ของไหลบิงแฮม มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะพิเศษ และจะไม่เกิดการไหลอย่างทันทีทันใดเมื่อได้รับความเค้น แต่เมื่อได้รับความเค้นที่มีขนาดมากกว่าความเค้นเฉือนค่าหนึ่งที่เรียกว่า yield stress โครงสร้างภายในจะเกิดการสูญเสียสภาพ และเริ่มเกิดการไหลที่ค่าความเค้นเฉือนมากกว่าค่านี้ ได้เส้นโค้งของการไหลเป็นเส้นตรง กล่าวคือ มีพฤติกรรมการไหลเช่นเดียวกับกรณีของไหลนิวทอนเนียน สมบัติการไหลของของไหลบิงแฮมอธิบายได้โดยใช้สมการที่ 2.5

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta}(\tau - \tau_y) \quad (9)$$

$$\text{เมื่อ } \tau \geq \tau_y$$

ตัวอย่างของไหลที่เป็นของไหลบิงแฮม เช่น ยาสีฟัน ซอสมะเขือเทศ และของไหลที่ใช้ในการขุดเจาะน้ำมัน (drilling fluid) เป็นต้น

#### ○ ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid)

การไหลของของไหลซูโดพลาสติกมีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน เรียกการไหลแบบนี้ว่าเป็นพฤติกรรมแบบลดความหนืด (Shear thinning behavior) นอกจากนี้เส้นกราฟของการไหล จะมีแนวโน้มขนานกับแกนของอัตราเฉือนเมื่อค่าอัตราเฉือนมีค่าสูง สมบัติเด่นอีกอย่างหนึ่งของของไหลชนิดนี้คือ ไม่มีลักษณะที่มีค่าความเค้นคงที่ ขณะเพิ่มอัตราเฉือน (Yield stress) เหมือนกรณีของไหลบิงแฮม

มีการเสนอสมการจำนวนมาก เพื่ออธิบายสมบัติการไหลของของไหลซูโดพลาสติก แต่สมการที่ได้รับการยอมรับในความถูกต้องมากที่สุดคือ สมการยกกำลัง (Power law equation หรือ Ostwald-de Waele equation) รายละเอียดของสมการ แสดงดังในสมการที่ (10)

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (10)$$

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1}$$

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีของสมการยกกำลังหรือดัชนีอนนิวทอเนียน  
 $K$  คือ ดัชนีของความเหนียวแน่น (Consistency index)

สามารถใช้ค่าดัชนีของสมการยกกำลังในการจำแนกชนิดของของไหลได้ กล่าวคือ ของไหลนิวทอเนียนมีค่า  $n = 1$  เสมอ แต่ของไหลซูโดพลาสติกจะมีค่า  $n$  น้อยกว่า 1 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ อาหารเหลวชนิดต่างๆ เป็นต้น

โดยทั่วไปสมการยกกำลังไม่สามารถใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลตลอดช่วงของอัตราเฉือน แต่สามารถใช้สมการยกกำลังอธิบายสมบัติของของไหลเมื่อกราฟระหว่าง  $\log$  กับ  $\log$  เป็นเส้นตรงเท่านั้นและค่า  $n$  ของสมการยกกำลังสามารถหาได้จากความชันของความสัมพันธ์ข้างต้น

พอลิเมอร์หลอมขณะไหลในเครื่องแปรรูปมีพฤติกรรมซับซ้อนกว่าการอธิบายด้วยสมการยกกำลัง กล่าวคือ มีเวลาในการผิดรูป (Deformation) และการคืนตัวของโมเลกุล (Relaxation) หรือมีเวลาของการคลายตัว (Relaxation time) เข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในทางวิศวกรรมและเทคโนโลยีพอลิเมอร์มักจะอนุโลมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการออกแบบและสร้างเข้าหัวตาย และการทดสอบสมบัติการไหลเบื้องต้นของพอลิเมอร์หลอมเสมอ แต่บรรดานักเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทราบดีว่าการใช้สมการยกกำลังเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายพฤติกรรมทุกด้านของพอลิเมอร์หลอม โดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องการไหลแบบยืด (Extensional flow) และการเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity) ได้ การใช้สมการยกกำลังเป็นเพียงการประเมินสมบัติการไหลในเบื้องต้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์หลอมทุกชนิดมีสมบัติเป็นของไหลแบบซูโดพลาสติกในช่วงของอัตราเฉือนเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าพอลิเมอร์หลอมที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของอัตราเฉือนที่ต่ำมาก ( $< 3$  วินาที<sup>-1</sup>) และสูงมาก จะมีสมบัติเป็นของไหลนิวทอเนียน

นอกจากสมการยกกำลังแล้วยังมีสมการชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลของของไหลซูโดพลาสติก สรุปได้ดังสมการที่ 11-13 แต่สมการเหล่านี้ไม่ได้รับความนิยมเท่าสมการยกกำลัง

สมการพรานด์ท์ (Prandtl equation)  $\tau = A \sin^{-1}(\dot{\gamma}/C)$  (11)

สมการไอริง (Eyring equation)  $\tau = \dot{\gamma}/B + C \sin(\tau/A)$  (12)

สมการ คาร์รีวีย์ (Carreau equation)

$$\tau = \dot{\gamma} \left( \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / \left( 1 + (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_b)^2 \right)^{n/2} \right) \quad (13)$$

เมื่อ  $A, B$  และ  $C$  คือ ค่าคงที่  
 $\eta_{\infty}$  คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนอนันต์ หรือความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนสูงมากๆ (Infinity shear viscosity)  
 $\eta_0$  คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนที่มีค่าอัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Zero shear viscosity)

### ○ ของไหลแลทแท้น (Dilatant Fluid)

การไหลของของไหลโดแลทแท้นมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน เรียกพฤติกรรมของการไหลแบบนี้ว่าเป็น พฤติกรรมการไหลแบบเพิ่มความหนืด (Shear thickening behavior) ตัวอย่างของไหลที่แสดงพฤติกรรมการไหลในลักษณะนี้ เช่น การไหลของปูนซีเมนต์ การไหลของน้ำผสมแป้ง และการไหลของพอลิเมอร์แขวนลอยที่มีสารตัวเติมในปริมาณสูง (Highly filled suspensions) เป็นต้น สามารถใช้สมการยกกำลัง ในการอธิบายสมบัติการไหลของของไหลโดแลทแท้นได้เช่นกัน ตามสมการยกกำลังของของไหลโดแลทแท้นคือของไหลที่มีค่า  $n$  มากกว่า 1 สมการยกกำลังสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลชนิดต่างๆ

### -กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลขึ้นกับเวลา (Time Dependent Fluids)

สมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ เช่น ความหนืดเฉือน เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ของไหลถูกเฉือน หรืออาจจะเรียกได้ว่าของไหลชนิดนี้มีประวัติของการเฉือน (Shear history) ของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

#### ของไหลทริกโซทรอปิก (Thixotropic Fluids)

ลักษณะเฉพาะของการไหลของของไหลชนิดนี้คือ ค่าความหนืดของการผิรุ้ครั้งหลังจะต่ำกว่าความหนืดของการผิรุ้ครั้งก่อน ดังนั้นสมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ขึ้นกับระยะเวลาที่ถูกเฉือน เช่น ถ้ากวนของไหลชนิดนี้เป็นเวลานานด้วยอัตราเฉือนคงที่ จะทำให้สมบัติการไหล เช่น ความหนืดเฉือนลดลง นอกจากนี้ถ้าเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากการใช้อัตราเฉือนที่คงที่ แต่มีค่าแตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มค่าอัตราเฉือนส่งผลให้ความเค้นเฉือนลดลง

เพื่อความเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของของไหลทริกโซทรอปิก ทำการทดลองวัดสมบัติการไหลโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบหมุนที่สามารถวัดทอร์กและความเค้นเฉือนได้ทำการกวนของไหลที่ความเร็วค่าหนึ่งแล้ววัดค่าความเค้นไว้ แล้วเพิ่มความเร็วในการกวนแล้ววัดความเค้น ทำอย่างนี้ที่หลายความเร็วของการหมุน จนถึงความเร็วสูงสุดของการหมุน หลังจากนั้นเริ่มลดความเร็วของการหมุนโดยไม่หยุดเครื่อง แล้ววัดความเค้นที่ค่าความเร็วของการหมุนเท่ากันผลการทดลองพบว่าเส้นกราฟของความเค้นของการเพิ่มและลดความเร็วของการหมุนจะไม่ซ้อนทับกันเกิดเป็น Hysteresis loop ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลทริกโซทรอปิก เช่น สีทาภายนอกและภายใน ยาน้ำบางชนิด สเลอรีของเซรามิกส์ เป็นต้น

#### ของไหลรีโอเปคติก (Rheopectic Fluids)

ของไหลรีโอเปคติกมีสมบัติการไหลกลับกับกรณีของไหลทริกโซทรอปิก กล่าวคือ ค่าของสมบัติการไหล เช่น ความหนืดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาของการเฉือน ทำให้ของไหลชนิดนี้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการถูกระทำด้วยความเค้นเฉือน ตัวอย่างของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้ เช่น แรยิบซัมในน้ำ เป็นต้น ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนเมื่อเวลาของการเฉือนเพิ่มขึ้นในของไหลรีโอเปคติก แสดงดังรูปที่ 2.8

#### ของไหลวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic Fluids)

ของไหลวิสโคอีลาสติก เป็นวัสดุที่แสดงสมบัติผสมระหว่างการไหลหนืด (viscous flow) และการยืดหยุ่น (elastic) อธิบายสมบัติการไหลโดยรวมได้ ดังนี้

$$\tau = \phi\left(\frac{d\gamma}{dt}, t\right) \quad (14)$$

เมื่อ  $d\gamma/dt$  คือ อัตราเฉือน  $\left(\dot{\gamma}\right)$



$\phi$  คือ สมบัติการไหลที่เกิดจากการไหลหนืดและการยืดหยุ่น  
 T คือ เวลา

ดังนั้นการพิจารณาการไหลของของไหลที่เป็นของไหลวิสโคอีลาสติกจะต้องแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

- สมบัติการไหลของของไหลนิวทอนเนียน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 15 กล่าวคือ ความหนืดของการไหลขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนเท่านั้น มีความพยายามในการอธิบายสมบัติการไหลโดยใช้ลูกสูบ เป็นแบบจำลองในการอธิบายพฤติกรรมของการไหล กล่าวคือ เมื่อได้รับแรงเฉือน ลูกสูบจะเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งใหม่ ถ้าหยุดให้แรง ลูกสูบยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ไม่มีการหดตัวกลับ นอกจากนี้งานที่ใช้ในการทำให้อะตอมอัดตัวจะสูญเสียไปทั้งหมด
- สมบัติของของแข็งยืดหยุ่น (Ideal elastic solids) ซึ่งมีพฤติกรรมตามกฎของฮุก (Hooke's law) ดังนี้

$$\tau = G\gamma \quad (15)$$

เมื่อ G คือ โมดูลัสเฉือน (Shear modulus)

ใช้สปริงเป็นตัวแทนในการอธิบายสมบัติของของแข็งยืดหยุ่น ดังนั้นเมื่อให้แรงเฉือนแก่สปริง จะเกิดการยืดออก ถ้าหยุดการให้แรง สปริงจะหดตัวกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งเดิมทำให้ปลดปล่อยงานทั้งหมดที่กระทำบนสปริง

ดังนั้นถ้าพิจารณาพฤติกรรมของการไหลของของไหลวิสโคอีลาสติก ต้องพิจารณาพฤติกรรมรวมของตัวแทนทั้งสองชนิด (คือ ลูกสูบ และ สปริง) ในกรณีให้แรงเฉือนของไหลวิสโคอีลาสติก เมื่อหยุดให้แรงเฉือนจะทำให้ลูกสูบหดตัวกลับระยะหนึ่งเนื่องจากอิทธิพลการหดตัวกลับของสปริง ในอดีตได้มีการพัฒนาแบบจำลองหลายชนิดเพื่ออธิบายพฤติกรรมของของไหลวิสโคอีลาสติก แต่แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) และแบบจำลองของวอยท์ (Voigt model) ประสบความสำเร็จในการอธิบายพฤติกรรมเบื้องต้นของไหลชนิดนี้มากที่สุด

ตัวอย่างวัสดุที่เป็นมีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก เช่น พอลิเมอร์ที่หลอมสารละลายพอลิเมอร์ และยางที่เป็นทั้งยางดิบและยางที่มีการเชื่อมโยงแล้ว เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จะแสดงพฤติกรรมไหลที่ซับซ้อน โดยจะต้องนำเอาเวลาในการพัก (relaxation time) และการพักโมดูลัส (relaxation modulus) เข้ามาพิจารณาเพื่อที่จะประเมินพฤติกรรมที่แท้จริงของการไหลและการผิดรูป

#### พฤติกรรมไหลของพอลิเมอร์หลอม

พอลิเมอร์หลอมแสดงพฤติกรรมสอดคล้องกับการไหลของไหลซูดพลาสติก ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าพอลิเมอร์หลอม แสดงสมบัติเป็นของไหลที่มีสมบัติขึ้นกับเวลาด้วย กล่าวคือ มีสมบัติการไหลเป็นแบบของไหลวิสโคอีลาสติกด้วยเนื่องจากมปรากฏการณ์หลายอย่างที่ยังถึงการมีสมบัติการไหลของของวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอม เช่น การบวมพองที่หัวตาย (Die swell หรือ Extrudate swell) การบวมพองในขณะรีด (Calendar swell) และการเกิด Frozen-in ในกระบวนการฉีดพอลิเมอร์

#### พอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลซูดพลาสติก

ดังได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า การประเมินสมบัติขั้นต้นของพอลิเมอร์หลอม นิยมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนั้นกรณีนี้พอลิเมอร์หลอมจะมีพฤติกรรมไหลแบบของไหลซูดพลาสติก เส้นกราฟของความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนในสเกล log-log มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ค่าความหนืด

ต่ำมากและสูงมาก กล่าวได้ว่าที่สองของอัตราเฉือนนี้ พอลิเมอร์หลอมมีสมบัติเป็นของไหลนิวทอเนียน ค่าความหนืดเฉือนที่ค่าอัตราเฉือนต่ำมากเรียกว่า ค่าความหนืดเฉือนที่มีอัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Zero shear viscosity) ส่วนค่าความหนืดที่ค่าอัตราเฉือนมากเรียกว่า ความหนืดเฉือนอนันต์ (Infinity shear viscosity) ช่วงกลางของเส้นกราฟของความหนืด ค่าความหนืดเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ในช่วงกลางนี้เอง พอลิเมอร์หลอมจะแสดงพฤติกรรมเป็นไปตามสมการยกกำลัง และเป็นของไหลชิวโดพลาสติก

ถ้าพอลิเมอร์หลอมไม่มีสมบัติการไหลเป็นของไหลชิวโดพลาสติก กล่าวคือความหนืดไม่ลดลงตามอัตราเฉือนจะทำให้การแปรรูปของพอลิเมอร์หลอมทำได้ยากมาก เนื่องจากค่าความหนืดที่สูง แต่เป็นที่โชคดีที่เมื่ออัตราเฉือนมีค่ามาก ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมลดลง จึงทำให้สามารถแปรรูปพอลิเมอร์หลอมได้ง่ายขึ้น การมีสมบัติเป็นของไหลชิวโดพลาสติกของพอลิเมอร์หลอม ทำให้มีข้อดีหลายประการดังนี้

- ทำให้ลดพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ง่ายขึ้น
- สามารถใช้เครื่องจักรที่ต้องการกำลังต่ำได้
- เพิ่มปริมาณการผลิตของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ได้ดี
- ความดันในการแปรรูปต่ำ
- สามารถทำให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าเบาที่มีความซับซ้อนได้



### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

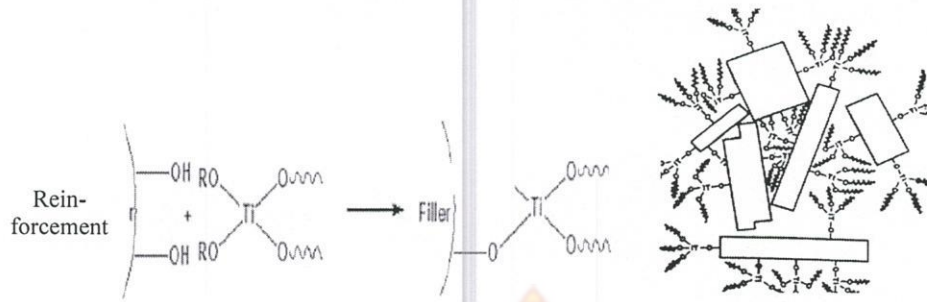
#### 3.1 การเตรียมวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) และวัสดุเนื้อพื้น (Polymer matrix)

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยวัสดุเนื้อพื้นคือพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) มีโครงสร้างเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block Copolymer) ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow index, MFI) 15 g/10 min. และวัสดุเสริมแรง ประกอบด้วยอนุภาคโบรอนไนไตรด์ (Boron nitride, BN) และคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fibers, CF) สัดส่วน L/D ของเส้นใย 53

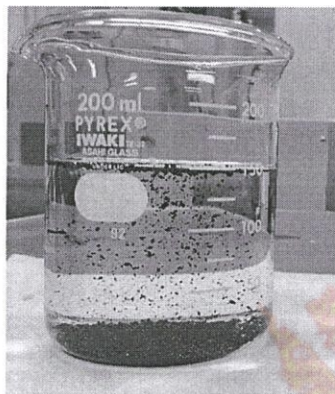
	คุณสมบัติของวัสดุ
พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรด 2500PC จากบริษัท IRPC	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow index, MFI) 15 g/10 min. อุณหภูมิผสม 160-240 องศาเซลเซียส Tensile strength at yield 23 N/mm <sup>2</sup>
โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride, BN) จากบริษัท Tanyun ประเทศจีน	รูปร่างเป็นเกล็ดสีขาว (Flake) ขนาดอนุภาค 16-20 $\mu\text{m}$ ความหนาแน่น 2.29 g/cm <sup>3</sup> อุณหภูมิหลอมเหลว 3,000 องศาเซลเซียส
คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fibers, CF) จากบริษัท Showa Denko K. K.,	เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 nm ความยาว 8 $\mu\text{m}$ สัดส่วน L/D ของเส้นใย 53 อุณหภูมิหลอมเหลว 2,000 องศาเซลเซียส

#### -การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ

สารคู่ควบไททานเตต (Titanate coupling agent, KR138S) โดยใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) ที่ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนักของวัสดุเสริมแรง ทำการปั่นผสมเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate stirrer) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 ชม. หลังจากนั้นทำการเผาเพื่อไล่สารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชม. ในงานวิจัยทำการปรับปรุงพื้นผิวในการเติมสารเสริมแรง 1 ชนิดคือ โบรอนไนไตรด์ (BN) และ คาร์บอนไฟเบอร์ (CF)



รูปที่ 3.1 ลักษณะการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวของสารเสริมแรงโดยใช้สารคู่ควบไททาเนต [31]



(a) Non-treated



(b) Treated with Titanate coupling agent

รูปที่ 3.2 เปรียบผลของสารคู่ควบที่เคลือบผิวของสารเสริมแรง

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วยกิจกรรมต่างๆ แสดงรายละเอียดดังนี้ ซึ่งแผนผังแสดงขั้นตอนและกิจกรรมดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.3

กิจกรรมที่ 1 การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลอง

ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยการเติมไฮบริดฟิลเลอร์ที่มีขนาด รูปร่าง และ/หรือ ชนิดที่ต่างกัน เพื่อการเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และช่วยในการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัยตัวแปรที่สำคัญ

กิจกรรมที่ 2 จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

จัดหาวัสดุที่ใช้ในการทดลองและจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

กิจกรรมที่ 3 การเตรียมพอลิโพรพิลีน/ไฮบริดฟิลเลอร์คอมโพสิต โดยเติมอนุภาคโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์

ศึกษาหาสภาวะและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำคอมพาวด์โดยการหลอมผสมของพอลิโพรพิลีน/อนุภาคโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต

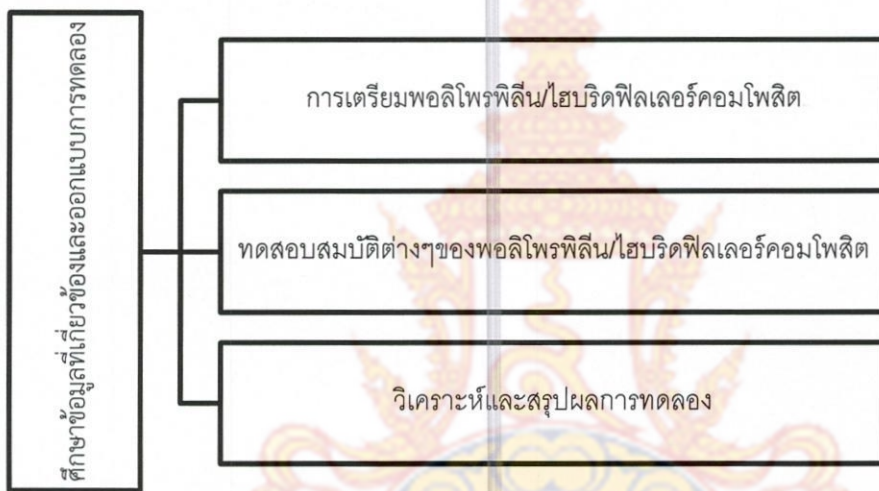
กิจกรรมที่ 4 ทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิโพรพิลีน/ไฮบริดฟิลเลอร์คอมโพสิต

ทำการเตรียมชิ้นงานของวัสดุผสมเพื่อนำไปทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้ ทดสอบรีโอโลยีหรือการไหลของพอลิเมอร์ ทดสอบสมบัติการนำความร้อน ทดสอบสมบัติทางความร้อน ทดสอบความเป็นผลึกของวัสดุผสม (XRD และหรือ DSC) ทดสอบการนำไฟฟ้า เป็นต้น

ศึกษาหาความเชื่อมโยงระหว่างการจัดเรียงตัว และอัตราส่วนผสมของไฮบริดฟิลเลอร์ระหว่างอนุภาคโบรอนไนไตรด์กับคาร์บอนไฟเบอร์ในพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ ด้วยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กิจกรรมที่ 5 การวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

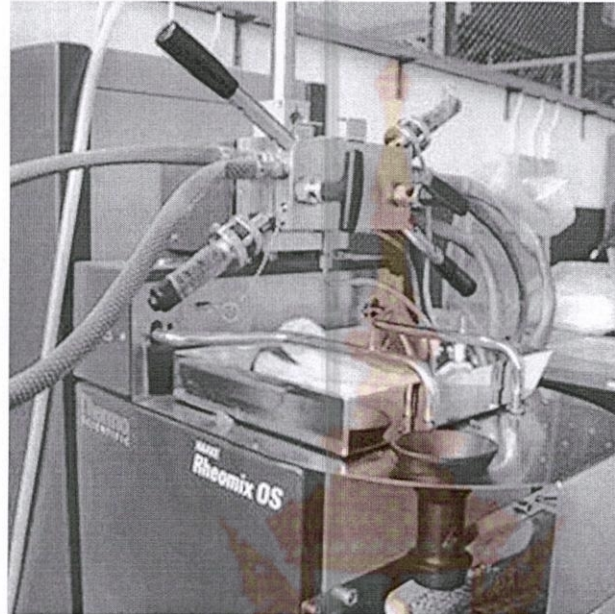
วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติของพอลิโพรพิลีน/ไฮบริดฟิลเลอร์คอมโพสิต จากการทดลองสมบัติการนำความร้อน สมบัติทางความร้อน สมบัติการนำไฟฟ้า การไหลของพอลิเมอร์ เพื่อนำมารวบรวมสรุปผลการศึกษาวิจัย เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ และเผยแพร่งานวิจัยต่อไป



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนและกิจกรรมการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) โดยทั่วไปเป็นเครื่องผสมระบบปิด ให้ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการผสมมากกว่าการใช้เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งเพราะสารเคมีไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการผสม ลดการสูญเสียสารเคมีขณะผสม



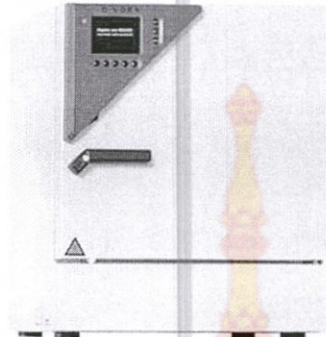
รูปที่ 3.4 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

- เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression) ใช้ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยใช้แรงอัดและความร้อน 180-200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

-เตาอบไล่ความชื้น พอลิพรพิลีน โบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์ ผ่านกระบวนการอบ ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชม. หลังจากนั้นนำวัสดุเสริมแรงทั้งสองชนิดผ่านกระบวนการปรับพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานเนต หลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชม.



รูปที่ 3.6 เตาอบไล่ความชื้น

(<http://www.addvise.se/laboratorieutrustning/klimatkammare/>)

### 3.3 เครื่องมือในการทดสอบสมบัติของวัสดุ

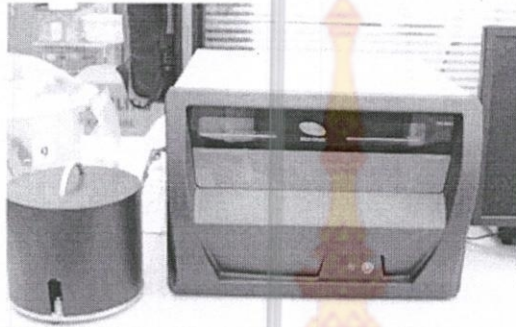
- ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอรีเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC) ของ Seiko Instruments โดยชั่งตัวอย่างในแพนอะลูมิเนียมจากนั้นอัดปิดฝาและดำเนินการตามวิธีการดังนี้ คือทำการทดสอบโดยเริ่มให้ความร้อนจาก 25 ถึง 200°C ที่อัตรา 10 °C/min (First heating) จากนั้นทำให้เย็นตัวจาก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



รูปที่ 3.7 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอรีเมทรี รุ่น Perkin Elmer DSC8500

(<http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php?page=eqp>)

- ทดสอบสมบัติการนำความร้อนเครื่องมือวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity Analyzer) เป็นเครื่องมือใช้วิเคราะห์หาค่า Thermal Conductivity Thermal diffusivity และ specific heat สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว ฟิล์ม ผง และครีม เป็นต้น โดยตัวอย่างต้องเป็นเนื้อเดียวกัน พื้นผิวตัวอย่างของแข็งต้องเรียบเสมอกัน มีขนาดอย่างน้อย 5 x 5 x 1 cm ตัวอย่างฟิล์มและกระดาษ ขนาดอย่างน้อย 50x50x0.02 mm และตัวอย่างของเหลวควรมีปริมาตรอย่างน้อย 100 mL



รูปที่ 3.8 การนำความร้อน รุ่น Hot Disk/TPS 2500s

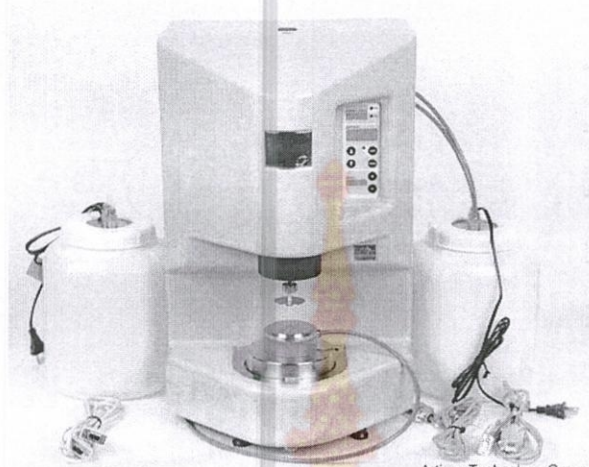
- การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning electron microscopy, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 3.9 สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป รุ่น FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)  
(<http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php?page=eqp>)



- ทดสอบรีโวลจี้ (Rheology) เป็นการศึกษสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เหลว โดยเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และเวลา (Time)



รูปที่ 3.10 ทดสอบรีโวลจี้ รุ่น Malvern Bohlin Gemini HR Nano Rheometer  
(<http://www.artisanrg.com/>)



## บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 5 ส่วนด้วยกัน

### 4.1 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยการเติมคาร์บอนไฟเบอร์

พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตทำการผสมด้วยกระบวนการหลอมคอมปาวด์ (Melt compounding) ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยความเร็ว 50 รอบ/นาที เวลาในการผสม 30 นาที หลังจากนั้นนำวัสดุคอมโพสิตทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น ด้วยเครื่องอัดรีด ที่อุณหภูมิ 200 °C เพื่อนำไปใช้ทดสอบสมบัติต่างๆ โดยอัตราส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต เพื่อศึกษาปัจจัยของการเติมสารเสริมแรงชนิดเดียวคือโบรอนไนไตรด์ การผสมกันของสารเสริมแรงที่มีรูปร่างแตกต่างกันคือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ รวมทั้งการใช้สารคู่ควบไททานเนตเพื่อการปรับปรุงพื้นผิว

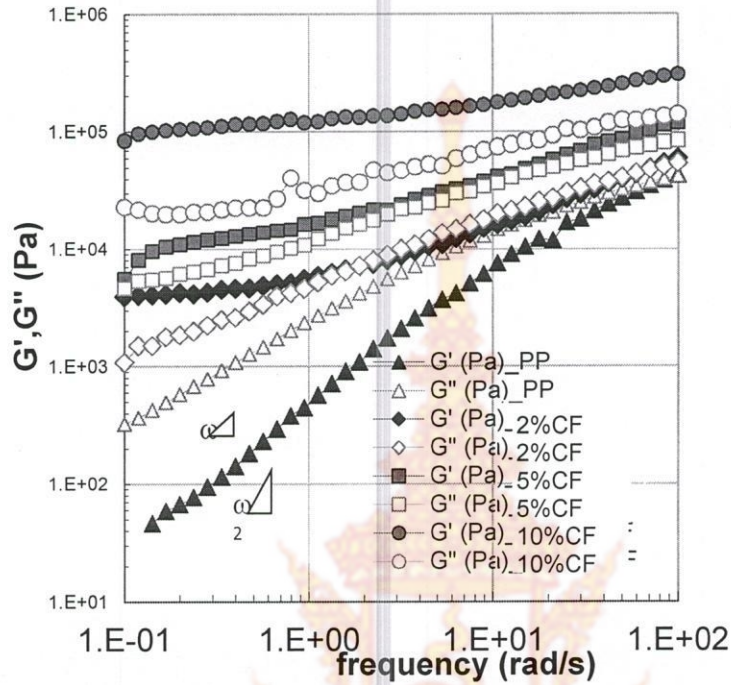
ตารางที่ 4.1 ระบบการทดลองของพอลิโพรพิลีน/โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต

	Code	BN (wt%)	CF (wt%)	Total Content of fillers (wt%)
1	Neat PP	-	-	0
2	PPCF2wt%	-	2	2
3	PPCF5wt%	-	5	5
4	PPCF10wt%	-	10	10
5	PPCF_Treat 2wt%	-	2	2
6	PPCF_Treat 5wt%	-	5	5
7	PPCF_Treat 10wt%	-	10	10
8	PP20%BN	20	-	20
9	PP25%BN	25	-	25
10	PP30%BN	30	-	30
11	PP40%BN	40	-	40
12	PP50%BN	50	-	50
13	PP55%BN	55	-	55
14	PP20%BN5%CF	20	5	25
15	PP20%BN5%CF_Treated	20	5	25
16	PP30%BN5%CF	30	5	35
17	PP30%BN5%CF_Treated	30	5	35
18	PP40%BN5%CF	40	5	45
19	PP40%BN5%CF_Treated	40	5	45

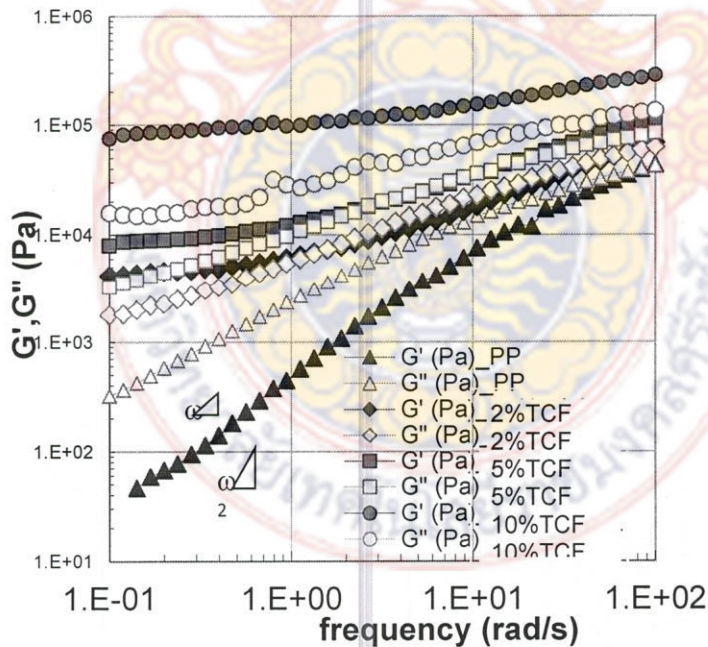
#### 4.2 สมบัติการไหล (รีโอโลยี) ของพอลิโพรพิลีน/ไบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต

##### 4.2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรง 1 ชนิดคือ ไบรอนไนไตรด์ หรือ คาร์บอนไฟเบอร์

(a) PP/untreated CF composites

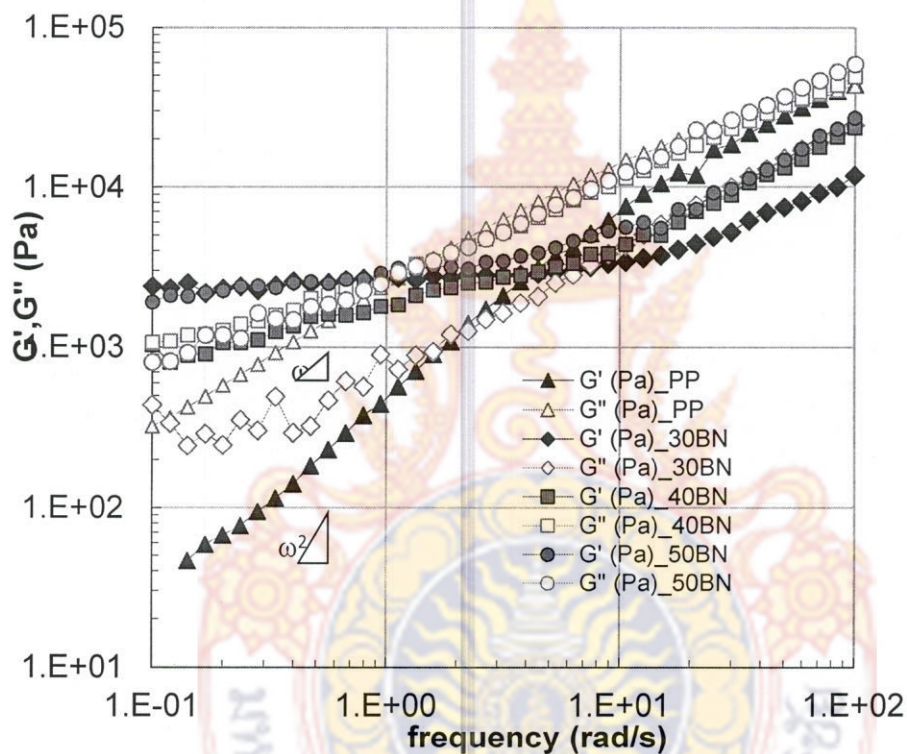


(b) PP/treated CF composites



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสม ( $G'$ ) มอดูลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการผสมกับคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fibers) และคาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Treated Carbon fibers)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ ( $\omega$ ) กับ โมดูลัสการสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) และโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ), แทนเดลต้า ( $\tan \delta$ ) และ ความหนืดไดนามิก (Dynamic Viscosity) ของพอลิโพรพิลีน/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต และพอลิโพรพิลีน/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวคอมโพสิตพบว่าวัสดุผสมดังกล่าวแสดงพฤติกรรมไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian viscosity) ในช่วงของความถี่ต่ำ และมีความชันของโมดูลัสการสะสมเท่ากับ 2 เมื่อเติมสารเสริมแรงพบว่าวัสดุแสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) ทั้งนี้ค่าโมดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเสริมแรง นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่าสารคู่ควบไททานตมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มของโมดูลัสสะสมและโมดูลัสสูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่อัตราส่วนผสม 5% และ 10% โดยน้ำหนัก แต่ในช่วงความถี่สูง โมดูลัสสะสมและโมดูลัสสูญเสียไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



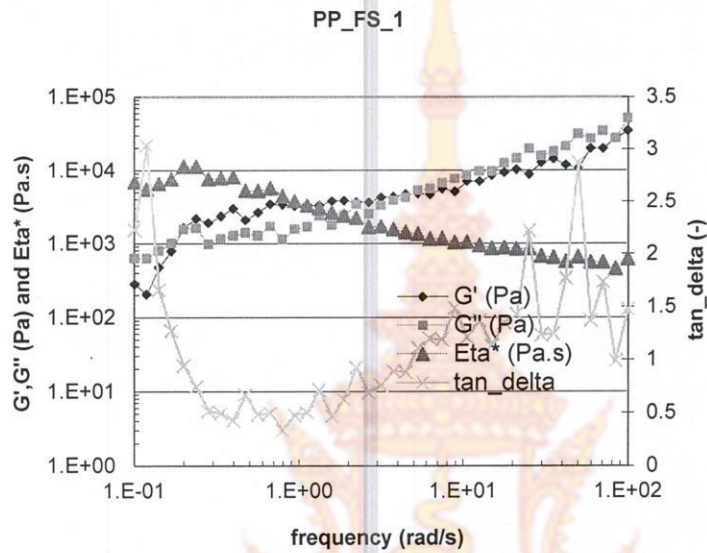
รูปที่ 4.2 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสสะสม ( $G'$ ) โมดูลัส ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการผสมโบรอนไนไตรด์ที่อัตราส่วน 30 40 และ 50% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.2 แสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสสะสม ( $G'$ ) โมดูลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยการผสมโบรอนไนไตรด์ที่อัตราส่วน 30 40 และ 50% โดยน้ำหนัก ในช่วงของความถี่ต่ำ มีค่าความชันของ โมดูลัสการสะสม มีความชันเท่ากับ 2 แสดงพฤติกรรมไหล สามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสสะสม ( $G'$ ) ของวัสดุพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต พบว่าพอลิโพรพิลีนแสดงพฤติกรรมหนืดไหล (viscous behavior) เมื่อปริมาณโบรอนไนไตรด์เพิ่มขึ้นค่า โมดูลัสสะสม ( $G'$ ) เพิ่มขึ้นเห็นได้ชัด แต่ในช่วงความถี่สูง โมดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในช่วงของความถี่ต่ำ มีค่าความชันของ โมดูลัสการสะสม มีความชันเท่ากับ 1 แสดงพฤติกรรม

ไหล สามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) ของวัสดุพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต พบว่าพอลิโพรพิลีนแสดงพฤติกรรมหนืดไหล (viscous behavior) เมื่อปริมาณโบรอนไนไตรด์เพิ่มขึ้นค่ามอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) เพิ่มขึ้นเห็นได้ชัด

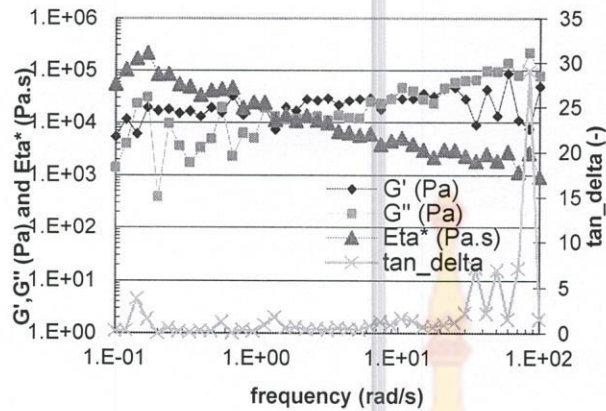
#### 4.2.2 พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรง 2 ชนิดคือ โบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์

Neat PP

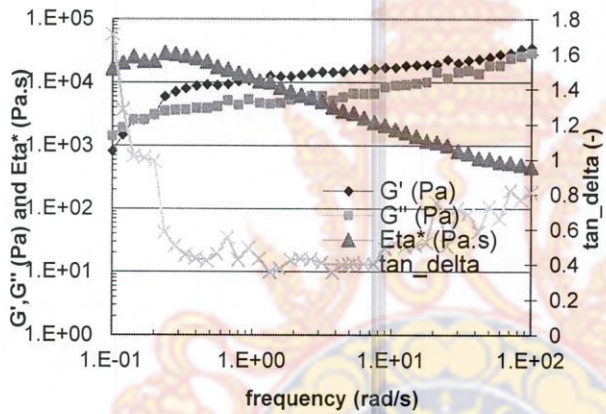


รูปที่ 4.3 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสกอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\eta^*$ ),  $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีน

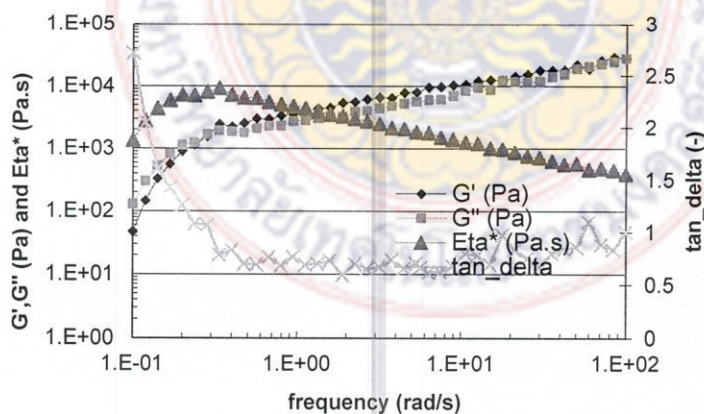
(a) PP/25wt%BN composites



(b) PP/20wt%BN/5wt%CF composites

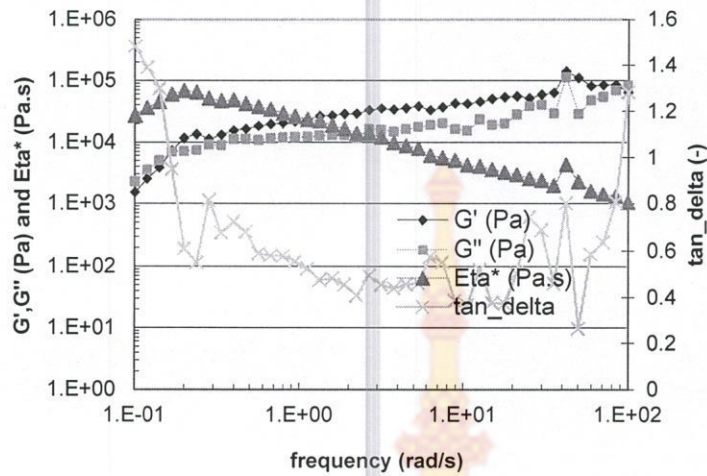


(c) PP/20wt%BN/5wt%Treated\_CF composites

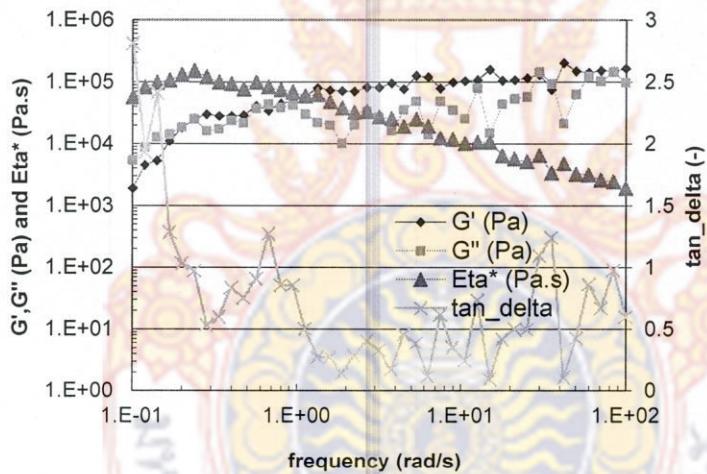


รูปที่ 4.4 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิก กวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\eta$ )) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เติม สารเสริมแรง 25% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่างการเติมสารเสริมแรง 1 ชนิดคือ โบรอนไนไตรด์ และสารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

(a) PP/30wt%BN/5wt%CF composites



(b) PP/30wt%BN/5wt%CF composites

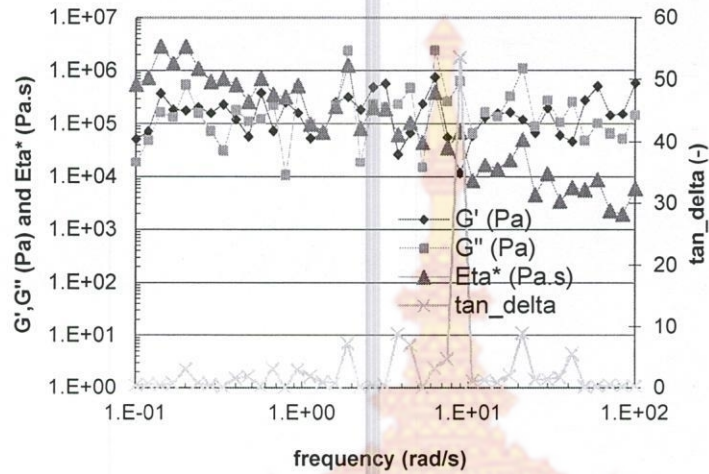


รูปที่ 4.5 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสม ( $G'$ ) มอดูลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\eta^*$ ),  $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เติมสารเสริมแรง 35% โดยน้ำหนัก โบรอนไนไตรด์ และสารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

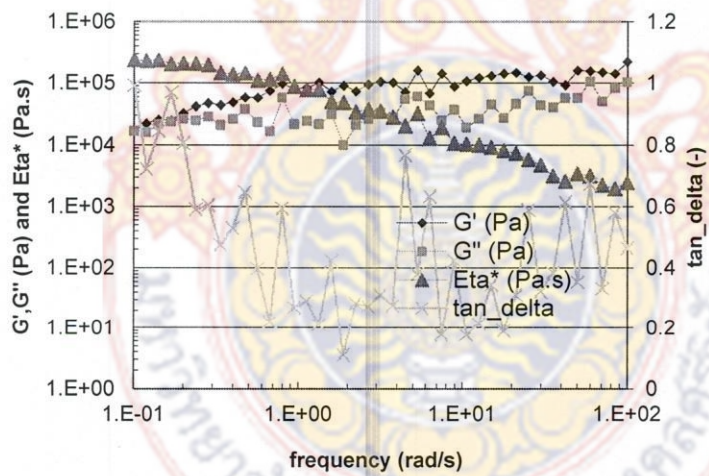
จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสม ( $G'$ ) มอดูลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของ PP PP/25wt%BN PP/20wt%BN/5wt%CF และ PP/20wt%BN/5wt%Treated\_CF ในช่วงของความถี่ต่ำ มีค่าความชันของมอดูลัสการสะสมและมอดูลัสสูญเสีย มีความชันเท่ากับ 2 ในช่วงความถี่ต่ำ และมีความชันเท่ากับ 1 ในช่วงความถี่สูง จากผลการทดลองพบว่าค่ามอดูลัสสะสม ( $G'$ ) และมอดูลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรงชนิดเดียวคือโบรอนไนไตรด์มีค่าสูงกว่าเติมสารเสริมแรงสองชนิด คือโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของการ

ปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารควบโททานเนต พบว่ามอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) มากกว่าพอลิพรพิลีน/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต

(a) PP/40wt%BN/5wt%CF composites



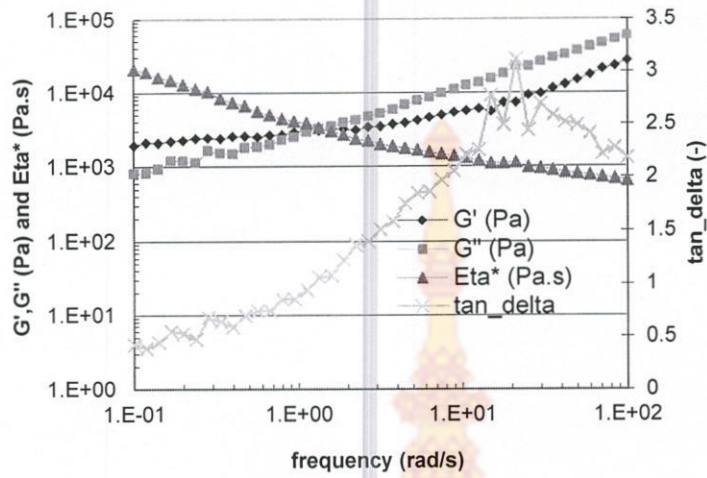
(b) PP/40wt%BN/5wt%CF composites



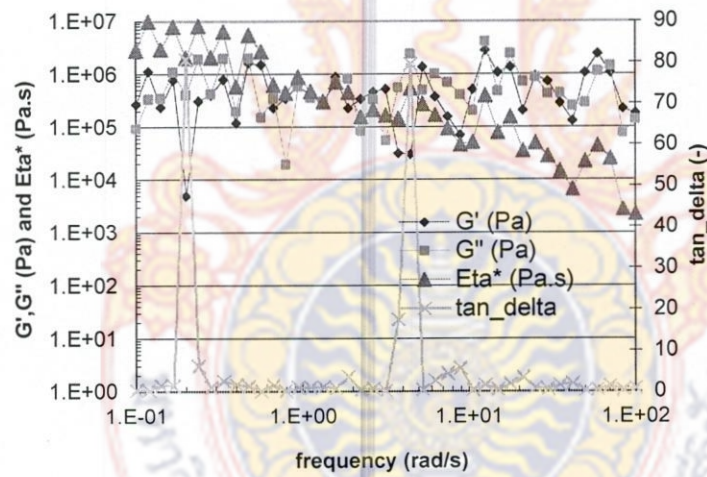
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\eta^*$ ),  $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิพรพิลีนคอมโพสิต ที่เติมสารเสริมแรง 45% โดยน้ำหนัก สารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว



(a) PP/50wt%BN composites

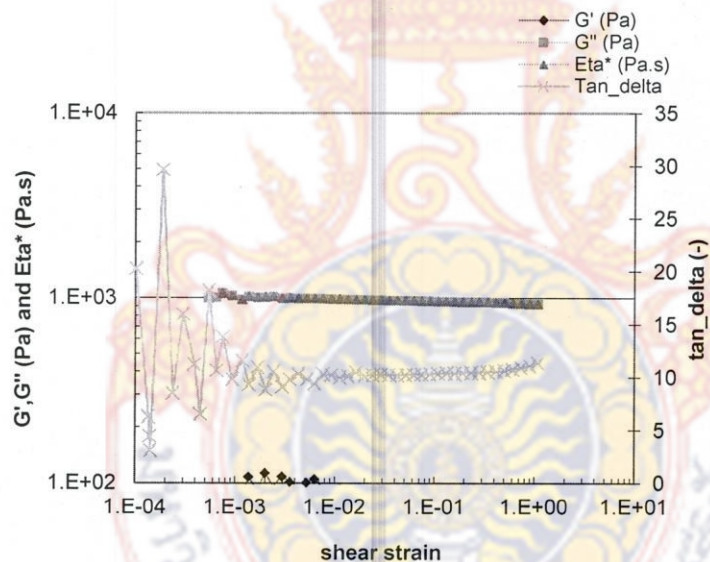


(b) PP/55wt%BN composites

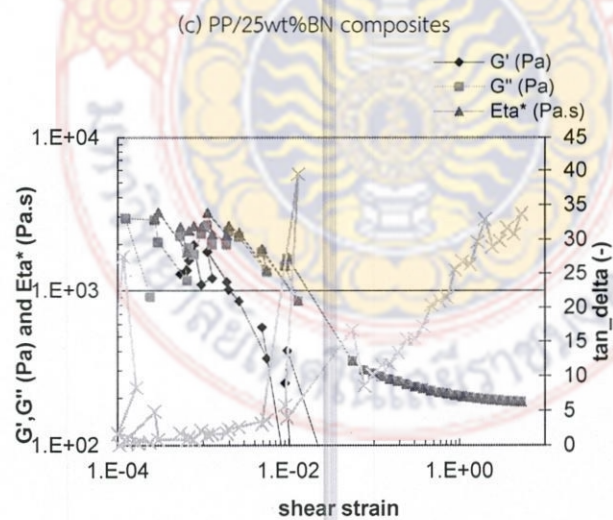
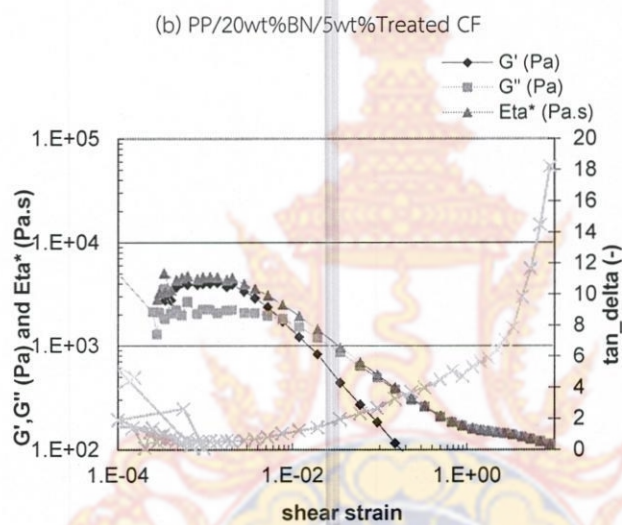
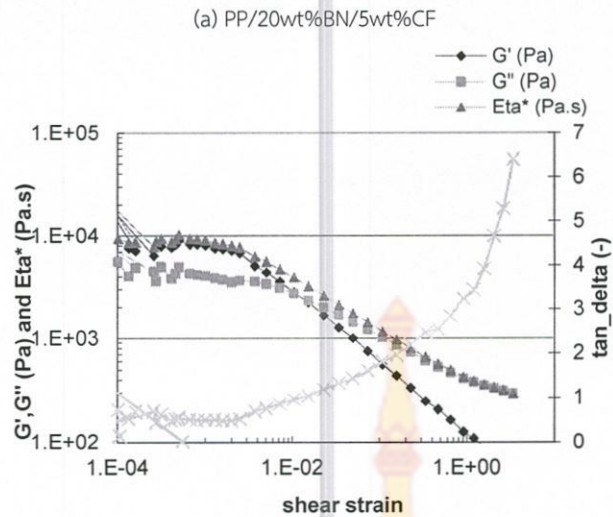


รูปที่ 4.7 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\eta^*$ ),  $\eta$ ) และ Tan delta กับความถี่ (Frequency) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เติมสารเสริม 50 และ 55% โดยน้ำหนัก โบรอนไนไตรด์

จากรูปที่ 4.5 แสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของ PP/30wt%BN/5wt%CF และ PP/30wt%BN/5wt%Treated\_CF ในช่วงของความถี่ต่ำ มีค่าความชันของ โมดูลัสการสะสมและมอดุลัสสูญเสีย มีความชันเท่ากับ 2 ในช่วงความถี่ต่ำ และมีความชันเท่ากับ 1 ในช่วงความถี่สูง จากผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีค่ามอดุลัสสะสม ( $G'$ ) และมอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) สูงกว่าที่เติมโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ จากรูปที่ 4.6 แสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความถี่ (Frequency) ของ PP/40wt%BN/5wt%CF และ PP/40wt%BN/5wt%Treated\_CF ในช่วงของความถี่ต่ำ มีค่าความชันของ โมดูลัสการสะสมและมอดุลัสสูญเสีย มีความชันเท่ากับ 2 ในช่วงความถี่ต่ำ และมีความชันเท่ากับ 1 ในช่วงความถี่สูง จากผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีค่ามอดุลัสสะสม ( $G'$ ) และมอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) สูงกว่าที่เติมโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ นอกจากนี้เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับกราฟในรูปที่ 4.7 ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมโบรอนไนไตรด์ 50 wt% และ 55wt% พบว่าค่ามอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ของการเติมสารเสริมแรงแรงชนิด BN/CF มากกว่าการเติมสารเสริมแรงชนิดเดียว BN



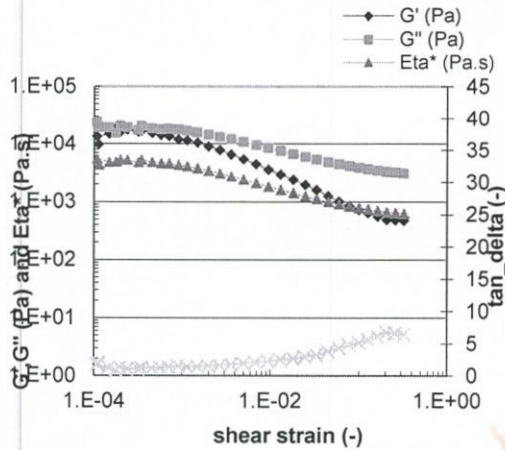
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสกอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\eta^*$ ),  $\eta$ ) และ Tan delta กับความเครียดเฉือน (Shear strain) ของพอลิโพรพิลีน



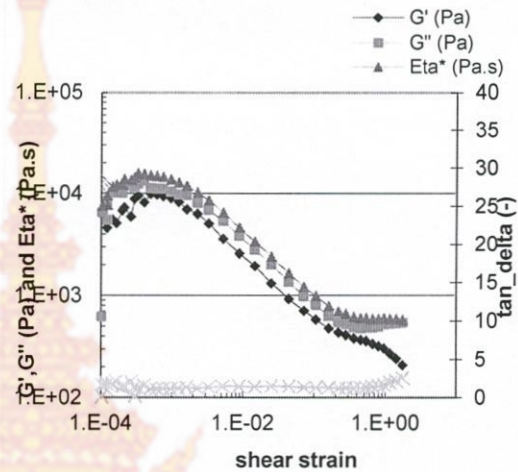
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสคอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\text{Eta}^*$ ),  $\eta$ ) และ Tan delta กับความเครียดเฉือน (Shear strain) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เติมสารเสริมแรง 25% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่างการเติมสารเสริมแรง 1 ชนิดคือ โบรอนไนไตรด์ และสารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความเครียดเฉือน (Shear strain) ของ PP PP/25wt%BN PP/20wt%BN/5wt%CF และ PP/20wt%BN/5wt%Treated\_CF พบว่าการปรับพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททาเนตมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปของสมบัติของวัสดุในการรับแรงความเครียดเฉือนของวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้น

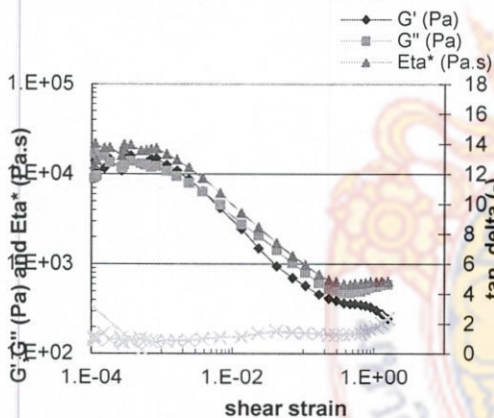
(a) PP/50BN composites



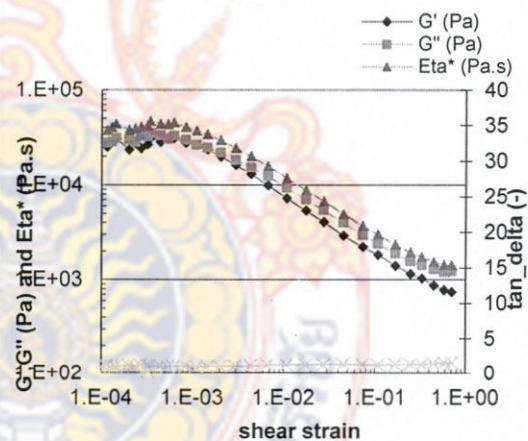
(b) PP/50wt%BN/1wt% Treated CF composites



(c) PP/50wt%BN/1wt%CF composites



(d) PP/55BN composites

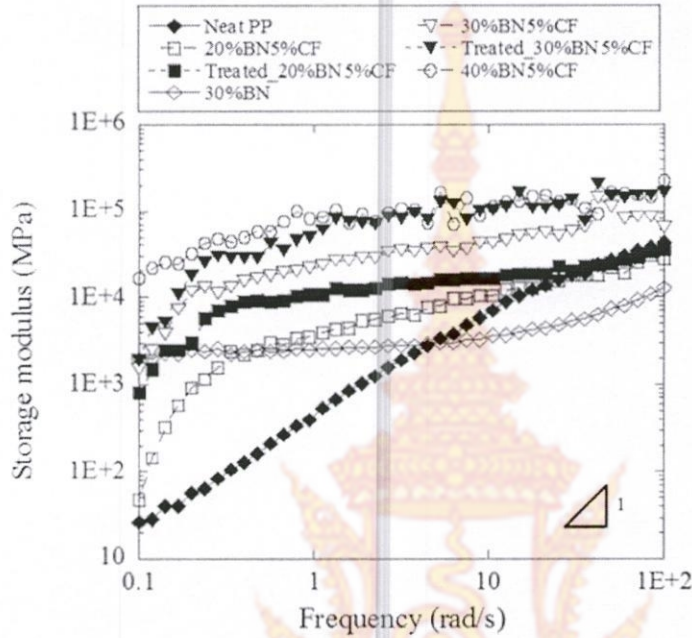


รูปที่ 4.10 พฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) ไดนามิกวิสกอสซิตี (Dynamic Viscosity ( $\eta^*$ ),  $\eta$ ) และ Tan delta กับความเครียดเฉือน (Shear strain) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เติมสารเสริมแรง 50% 51% และ 55% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่างการเติมสารเสริมแรง 1 ชนิดคือ โบรอนไนไตรด์ และสารเสริมแรง 2 ชนิด คือ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

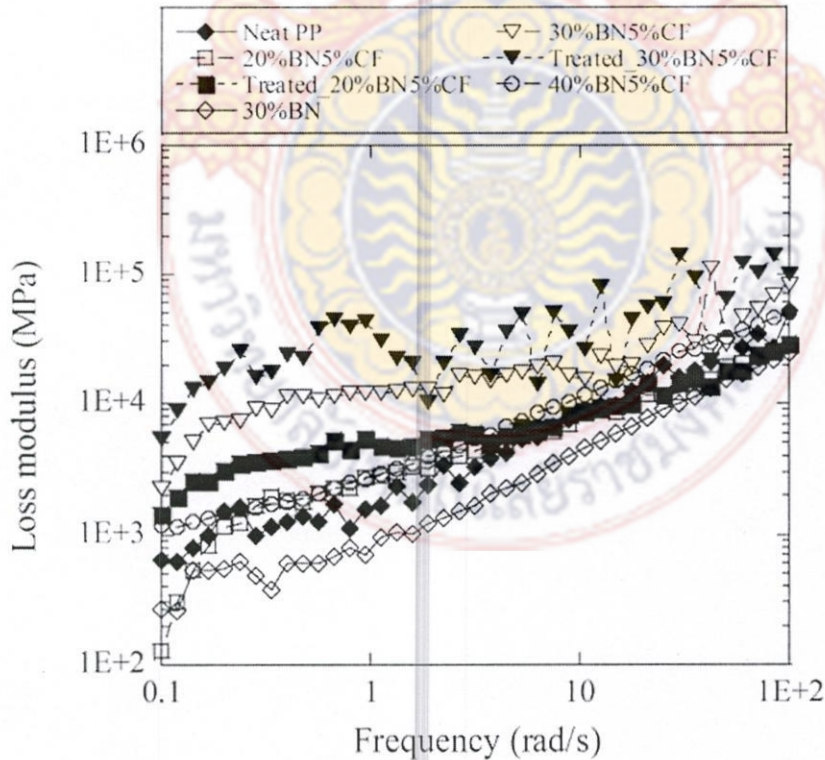
จากรูปที่ 4.10 แสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) แสดงการเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสสะสม ( $G'$ ) มอดุลัสสูญเสีย ( $G''$ ) กับความเครียดเฉือน (Shear strain) ของ PP PP/50wt%BN PP/55wt%BN PP/50wt%BN/1wt%CF และ PP/50wt%BN/1wt%Treated\_CF พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรง

ชนิดเดียวคือโพรพอนไนไตรด์มีพฤติกรรมการไหลที่สามารถรับแรงความเครียดเฉือนได้ดีกว่าเมื่อเปรียบกับการเติมสารเสริมแรงสองชนิดคือ BN/CF และ BN/Treated CF อันเนื่องมาจากการผสมระหว่างสารเสริมแรงสองชนิดนั้นอาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอขึ้นถึงแม้จะมีการปรับปรุงพื้นผิวช่วยในการกระจายตัวแล้วก็ตาม จึงส่งผลให้พฤติกรรมการไหลมีแนวโน้มลดลงแปรผันกับความเครียดเฉือนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมสารเสริมแรงชนิดเดียว

(a)



(b)



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ ( $\omega$ ) กับ (a) มอดูลัสการสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) และ (b) มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ )

จากรูปที่ 4.11 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ( $\omega$ ) กับมอดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) ของพอลิพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรง BN BN/CF และ Treated BN/CF จากผลการทดลองพบว่าพอลิพรพิลีนแสดงพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian viscosity) ในช่วงของความถี่ต่ำ และมีความชันของมอดูลัสการสะสมเท่ากับ 2 เมื่อเติมสารเสริมแรงพบว่าวัสดุแสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) ทั้งนี้ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเสริมแรง นอกจากนี้สารคู่ควบไททานเนตมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มของมอดูลัสสะสมของพอลิพรพิลีนคอมโพสิต แต่ในช่วงความถี่สูง มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

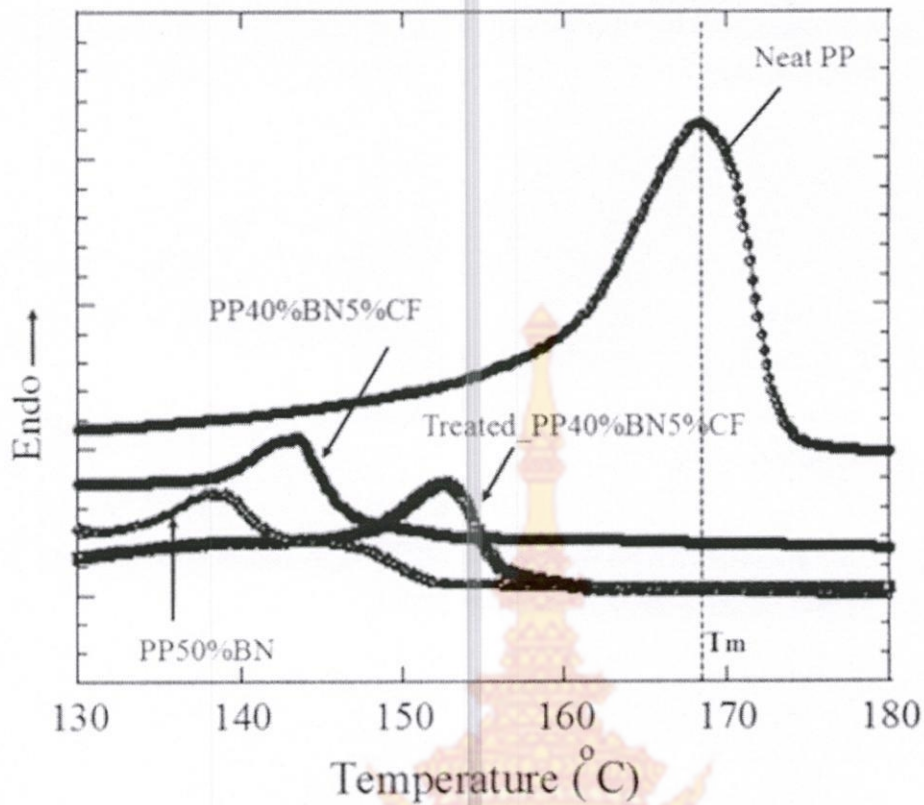
จากรูปที่ 4.11 (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ( $\omega$ ) กับมอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) พบว่าพอลิพรพิลีน พอลิพรพิลีน/30% โบรอนไนไตรด์คอมโพสิต พอลิพรพิลีน/20% โบรอนไนไตรด์/5%คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิตและพอลิพรพิลีน/30% โบรอนไนไตรด์/5%คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต แสดงพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian viscosity) ในช่วงของความถี่ต่ำแต่ที่อัตราส่วนอื่นๆ แสดงพฤติกรรมหนืดไหล (Viscous behavior) ในช่วงความถี่สูง โมดูลัสสูญเสียเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การปรับพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานเนตมีผลต่อการเพิ่มของมอดูลัสสะสมของวัสดุ

### 4.3 ผลการทดลองสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 2 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature,  $T_m$ ) และค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting,  $\Delta H_m$ ) ของพอลิพรพิลีนคอมโพสิตจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของพอลิพรพิลีน อยู่ที่ 168 °C และ ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting,  $\Delta H_m$ ) อยู่ที่ 78.41 J/g เมื่อเติมสารเสริมแรงโบรอนไนไตรด์ และโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว และปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ลดลง แต่สารเสริมแรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานเนต มีอุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิพรพิลีนคอมโพสิต โดยการเติมเสริมแรงโบรอนไนไตรด์ และโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์

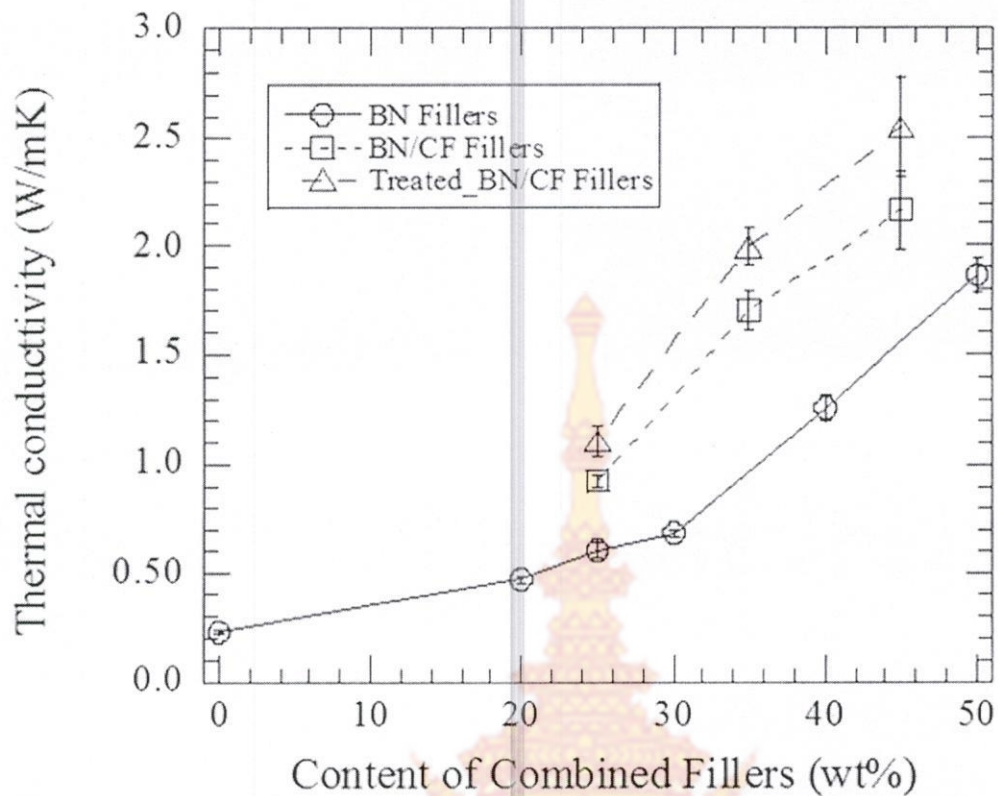
Sample	Melting temp (°C)	Cp (J/g)	%Xc [16]
Neat PP	168.33	78.41	37.70
PP10%BN	165.8	73.313	39.16
PP25%BN	145	38.164	24.46
PP20%BN5%CF	140.17	46.167	29.59
PP20%BN5%CF_Treated	142.4	46.119	29.56
PP40%BN5%CF	143.2	29.616	25.89
PP40%BN5%CF_Treated	145.7	28.842	25.21
PP50%BN	139	33	31.73



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงพลังงานเนื่องจากการดูดความร้อน ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมด้วยสารเสริมแรงจากโบรอนไนไตรด์ และ โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์

#### 4.4 ผลการทดลองสมบัติการนำความร้อน

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมอนุภาคของโบรอนไนไตรด์ มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นแปรผันกับปริมาณของโบรอนไนไตรด์ ค่าการนำความร้อนสูงสุดที่ 50 % โดยน้ำหนักของโบรอนไนไตรด์ เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเติมสารเสริมแรงสองชนิดที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ประกอบด้วยอนุภาคโบรอนไนไตรด์และเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ พบว่าค่าการนำความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่เติมสารเสริมแรงสองชนิด (BN/CF fillers) มีค่ามากกว่าการเติมสารเสริมแรงเพียงชนิดเดียว (BN fillers) ที่อัตราส่วนเดียวกัน นอกจากนี้พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของสารเสริมแรงด้วยสารคู่ควบไททานเตนมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับสารเสริมแรงที่ไม่ได้ทำการปรับพื้นผิว ค่าการนำความร้อนสูงสุดคือพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติม สารเสริมแรงโบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งผ่านการปรับพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานเตน (Treated BN/CF fillers) ที่ 45 % โดยน้ำหนัก (ค่าการนำความร้อนมากกว่าพอลิโพรพิลีน/50 % โบรอนไนไตรด์คอมโพสิต 36.56%)



รูปที่ 4.13 ค่าการนำความร้อนของพอลิโพรพิลีน/โบรอนไนไตรด์/คาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิต

#### 4.5 โครงสร้างอณูฐานของวัสดุด้วย SEM

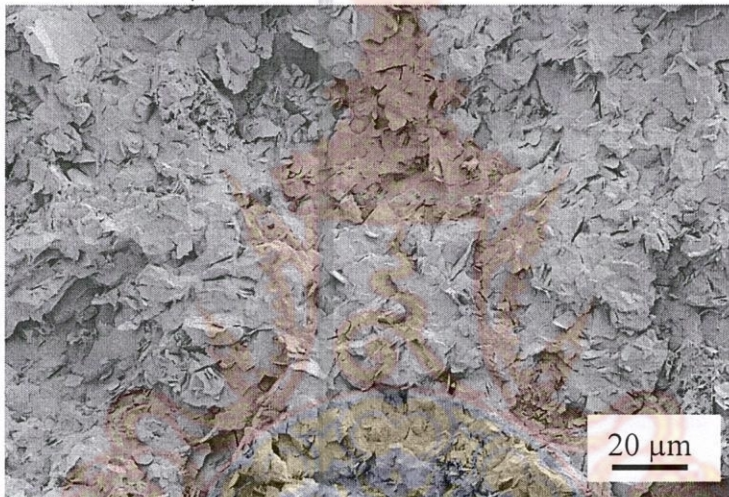
โครงสร้างอณูฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต จากรูปที่ 4.14 แสดงการกระจายตัว ที่อัตราส่วนผสม 10 20% และ 30% โดยน้ำหนักของโบรอนไนไตรด์ พบว่าอนุภาคโบรอนไนไตรด์กระจายตัวได้ดีในเนื้อพอลิเมอร์ การจัดเรียงตัวของอนุภาคโบรอนไนไตรด์มีความหนาแน่นมากขึ้น โดยระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง ซึ่งการจัดเรียงตัวของโบรอนไนไตรด์มีนัยสำคัญต่อการนำความร้อนและสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต และจากรูป 4.15 แสดงการกระจายตัว ที่อัตราส่วนผสม 5% และ 10% โดยน้ำหนักของคาร์บอนไฟเบอร์ พบว่าอนุภาคโบรอนไนไตรด์ในบางบริเวณเกิดการเกาะกลุ่มของคาร์บอนไฟเบอร์ในเนื้อพอลิเมอร์ การจัดเรียงตัวของอนุภาคคาร์บอนไฟเบอร์ความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อปริมาณสารเสริมแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนไฟเบอร์มีนัยสำคัญต่อการนำความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต



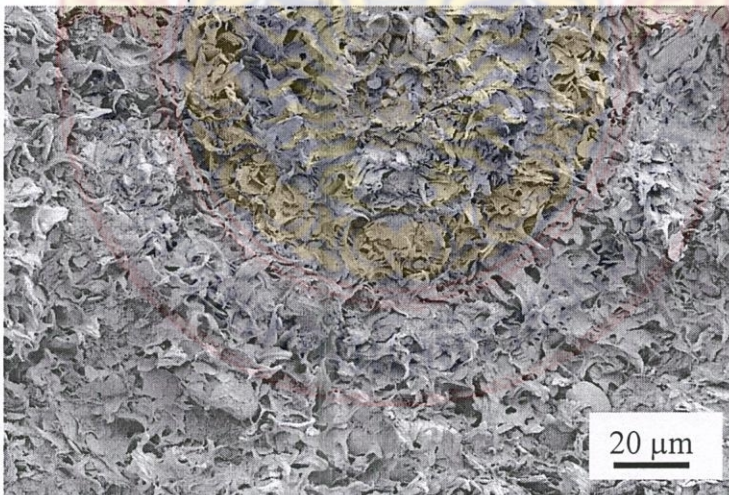
(a) PP/10wt%BN composites



(b) PP/20wt%BN composites



(c) PP/30wt%BN composites

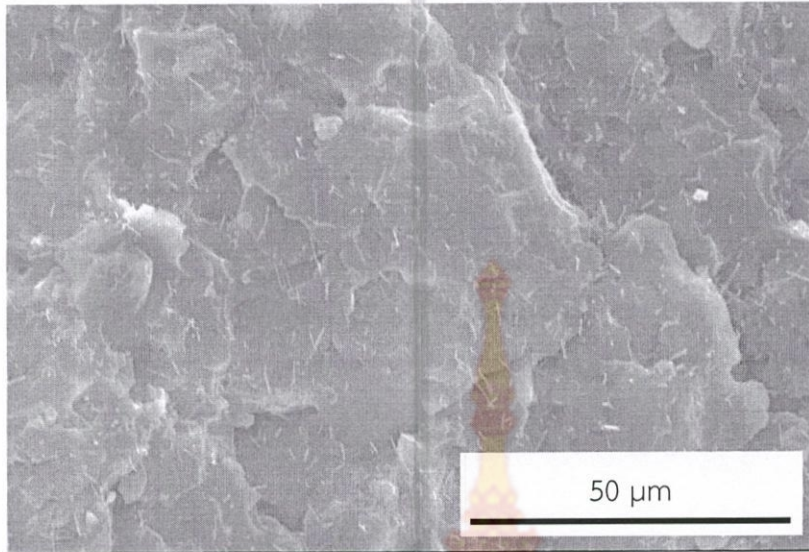


รูปที่ 4.14 พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเติมสารเสริมแรงโบรอนไนไตรด์ ที่อัตราส่วนผสม 10 20% และ 30% โดยน้ำหนัก

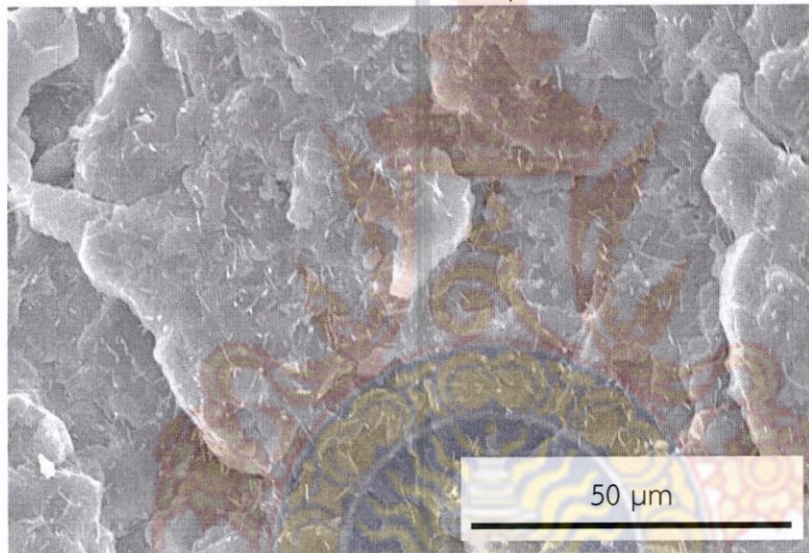
จากรูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างอณูฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรงสองชนิดที่มีรูปร่างแตกต่างกันโดยศึกษาพฤติกรรมของสารเสริมแรงเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานเนต ที่ปริมาณสารเสริมแรง 45% โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย 40% โดยน้ำหนักของโบรอนไนไตรด์ และ 5% โดยน้ำหนักของคาร์บอนไฟเบอร์ รูปที่ 5(a) 40% BN/5% CF และ รูปที่ 5(b) Treated 40% BN/5% CF จากภาพทั้งสองพบว่าเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของโบรอนไนไตรด์ แต่เมื่อพิจารณาปัจจัยของการใช้สารคู่ควบไททานเนตพบว่าเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์และโบรอนไนไตรด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน โดยมีขนาดของการเกาะกลุ่มเล็กลง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง จากรูปที่ 5 (c) แสดงการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์ที่ 50% โดยน้ำหนักพบว่าโบรอนไนไตรด์กระจายตัวหนาแน่นและสม่ำเสมอในเนื้อพื้นพอลิโพรพิลีน จากภาพโครงสร้างอณูฐานดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าปัจจัยของการเติมสารเสริมแรงที่มีรูปร่างต่างกันมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มสมบัติการนำความร้อนสมบัติทางกลของวัสดุ โดยเติมสารเสริมแรงในปริมาณที่ต่ำกว่าการเติมสารเสริมแรงโบรอนไนไตรด์อย่างเดียว นอกจากนี้การปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไททานเนตมีผลต่อการเพิ่มความสามารถของการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเนื้อพื้นพอลิเมอร์ โดยมีผลต่อการเพิ่มสมบัติของวัสดุ



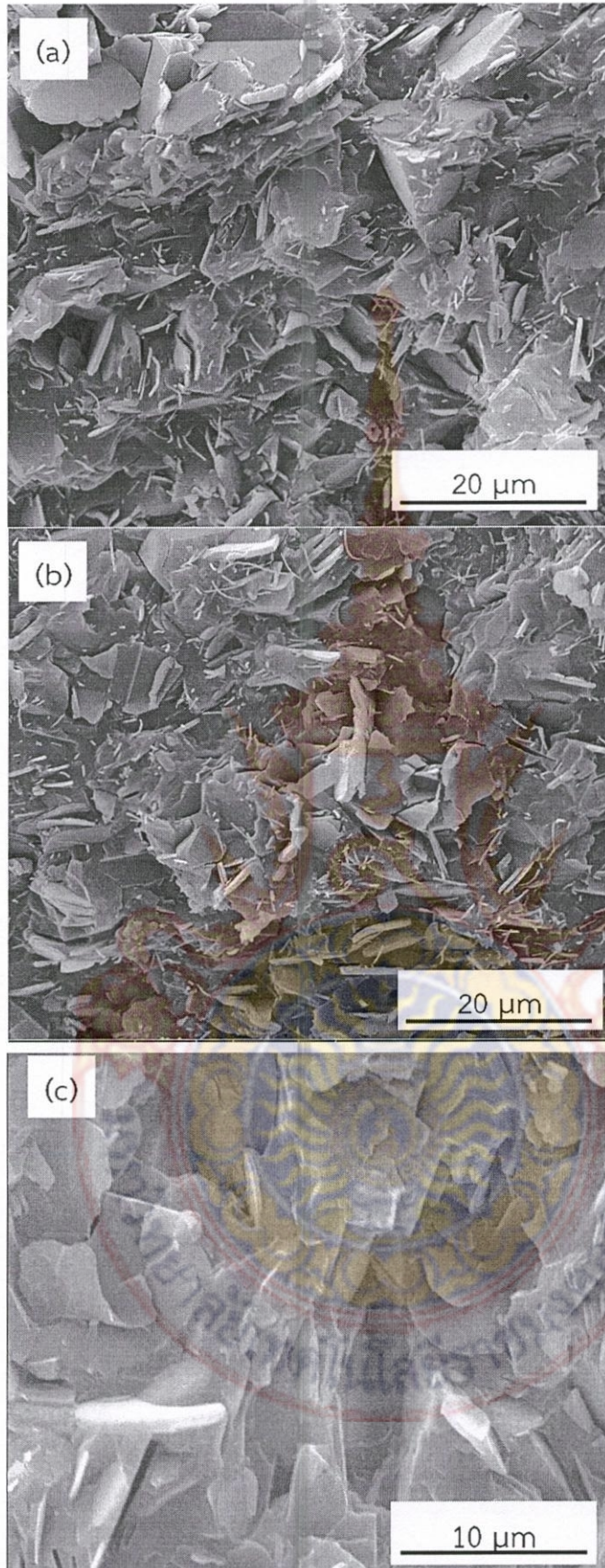
(a) PP/5 wt%CF composites



(b) PP/10 wt%CF composites



รูปที่ 4.15 โครงสร้างอณูฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต (a) 5 wt% CF และ (b) 10 wt% CF



รูปที่ 4.16 โครงสร้างอณูฐานของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต (a) 40 wt% BN/5 wt% CF  
(b) Treated 40 wt% BN/5 wt% CF และ (c) 50 wt% BN

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการทดลอง

พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เติมสารเสริมแรงสองชนิดที่มีรูปร่างแตกต่างกันคืออนุภาคแบบเกล็ดของโบรอนไนไตรด์และเส้นใยของคาร์บอนไฟเบอร์ มีสมบัติการนำความร้อนของวัสดุมากกว่าการเติมสารเสริมโบรอนไนไตรด์ที่อัตราส่วนเดียวกัน และมีแนวโน้มในการใช้ปริมาณสารเสริมรำน้อยกว่านอกจากนี้พบว่าสมบัติทางกลคือมอดูลัสการสะสมและมอดูลัสการสูญเสียของการเติมสารเสริมแรงชนิดเดียวมากกว่าการเติมด้วยสารเสริมแรงผสม อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวของสารเสริมแรงมีการเกาะกลุ่ม (Agglomeration) ส่งผลให้เกิดความเครียดสะสมวัสดุจึงมีทำให้สมบัติทางกลลดลง แต่เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานตพบว่าสามารถการปรับปรุงการกระจายตัวของโบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์ในเนื้อพอลิเมอร์ ส่งผลต่อการเพิ่มมอดูลัสการยืดหยุ่นและมอดูลัสสะสมของวัสดุ อีกทั้งอุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้สามารถสรุปได้ว่าสารคู่ควบไททานตมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงส่งผลให้ต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของสารเสริมแรงทำให้ระยะห่างระหว่างสารเสริมแรงลดลงมีผลต่อการเพิ่มสมบัติของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

นอกจากนี้โบรอนไนไตรด์และคาร์บอนไฟเบอร์มีผลต่อการเพิ่มโครงสร้างแหโดยการแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic behavior) ดังนั้นการเติมโบรอนไนไตรด์และ/หรือคาร์บอนไฟเบอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากหนืดไหล (viscous) เป็นยืดหยุ่น (Elastic) หรือเรียกว่าเกิดการเสริมแรง (Reinforcement) ขึ้น โครงสร้างแหทางกายภาพที่เกิดขึ้นและให้มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น อาจเกิดการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงสม่ำเสมอทั่วเนื้อเมทริกซ์ หรือเกิดจากการเรียงตัวชิดกันของอนุภาคต่อเนื่องเป็นโครงสร้างแหเมื่อปริมาณอนุภาคสูง หรือเกิดการดูดซับสายโซ่บนอนุภาค ทำให้อนุภาคทำหน้าที่เสมือนจุดเชื่อมขวาง (Crosslinked point) เป็นต้น ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนนั่นเอง และเป็นผลให้อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature,  $T_m$ ) และค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy of melting,  $\Delta H_m$ ) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน

#### ข้อเสนอแนะ

ควรจะศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของปัจจัยด้านอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของสารเสริมแรงเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานตในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์เพิ่มเติม

## บรรณานุกรม

- [1] Weidenfeller. B., Höfer, M., Schilling, F. R., "Thermal and electrical properties of magnetite filled polymers", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **33**(8), 1041-1053 (2002).
- [2] Al-Saleh. M. H., Sundararaj, U., "A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites", *Carbon*, **47**(1), 2-22 (2009)
- [3] 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)
- [4] Reed. J. S.: *Principles of ceramics processing*, 2<sup>nd</sup> Edition; John Wiley & Sons, Inc., New York (1995)
- [5] Zhou W, Wang C, Ai T, Wu K, Zhao F, Gu H. A novel fiber-reinforced polyethylene composite with added silicon nitride particle for enhanced thermal conductivity. *Composites Part A* 2009; **40**(6-7): 830-836.
- [6] Weidenfeller B, Höfer M, Schilling FR. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Composites Part A* 2004; **35**(4): 423-429.
- [7] Weidenfeller B, Höfer M, Schilling FR. Thermal and electrical properties of magnetite filled polymers. *Composites Part A* 2002; **33**(8): 1041-1053.
- [8] Liao CZ, Tjong SC. Effect of carbon nanofibers on the fracture, mechanical, and thermal properties of PP/SEBS-g-MA Blends. *Polym Eng Sci* 2011; **51**(5): 948-958
- [9] Li. S., Qi, S., Liu, N., Chao, O., "Study on thermal conductive BN/novolac resin composites", *Thermochim. Acta*, **523**, 111-115 (2011)
- [10] Hong. J. -P., Yoon, S. -W., Hwang, T., Oh, J. -K., Hong, S. -C., Lee, Y., Nam, J. -D., "High thermal conductivity epoxy composites with bimodal distribution of aluminium nitride and boron nitride fillers", *Thermochim. Acta*, **537**,70-75 (2012)
- [11] Zhou. W., "Thermal and dielectric properties of the aluminium particle reinforced liner low-density polyethylene composite", *Polym. Eng. Sci.*, **51**(5), 917 (2011)
- [12] Koyama. T., Tanoue, S., Iemoto, Y., "Preparation and properties of polypropylene /vapor grown carbon fiber composites monofilament by melt compounding", *J. Text. Eng.*, **55**(3), 73-83 (2009)
- [13] Han. Z., Fina, A., "Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites : A review", *Progress in Polymer Science*, **36**(7), 914-944
- [14] Choi. S. W., Yoon, K. H., Jeong, S. S., "Morphology and thermal conductivity of polyacrylate composites containing aluminum/multi-walled carbon nanotubes", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **45**, 1-5 (2013)
- [15] Pak. S. Y., Kim, H. M., Kim, S. Y., Youn, J. R., "Synergistic improvement of thermal conductivity of thermoplastic composites with mixed boron nitride and multi-walled carbon nanotube fillers", *Carbon*, **50**(13), 4830-4838 (2012)

- [16] Zhou W, Wang C, Ai T, Wu K, Zhao F, Gu H. A novel fiber-reinforced polyethylene composite with added silicon nitride particle for enhanced thermal conductivity. *Composites Part A* 2009; **40**(6-7): 830-836.
- [17] Hammel. E., Tang, X., Trampert, M., Schnitt, T., Mauthner, K., Eder, A., Pötschke, P., "Carbon nanofibers for composite applications", *Carbon*, **42**(5-6), 1153-1158 (2004)
- [18] Yu. S., Hing, P., Hu, X., "Thermal conductivity of polystyrene-aluminium nitride composite", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **33**(2), 289-292 (2002)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] ประณัฐ โปธิยะราช. "พอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์" ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์, 2556.
- [22] K. Oksmana. M. Skrifvarsb. J.-F. (2003). Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, **63**, 1317-1324.
- [23] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ กอบบุญ หล่อทองคำ และคณะ. 2548. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.
- [24] ผศ. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. 2549. วัสดุวิศวกรรม. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ
- [25] ผศ. ดร. เจริญ นาคะสรรรค์. 2545. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. สำนักพิมพ์โพร์เพช. กรุงเทพฯ
- [26] รศ. บรรเลง ศรีนิล. 2553. เทคโนโลยีพลาสติก. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. กรุงเทพฯ
- [27] บริษัทบางกอกโพลีเอธิลีนจำกัด. (2542). Injection, กรุงเทพฯ
- [28] อิทธิพล แจ่มชัด และสุภารัตน์ รักษลธิ. 2548. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- [29] วิริยะ ทองเรือง. (2554). วิศวกรรมพอลิเมอร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [30] รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ กลุ่มวิจัยการผลิตและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- [31] Parisa A., Amir G., Farhood N., Hanieh N., (2016) "Pivotal role of filler/matrix interface in dental composites: Review". *Biomedical Research* ISSN: 0970-938X (Print) | 0976-1683 (Electronic)

