



การเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโอเลฟิน/อีลาสโตเมอร์/
นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้งานด้านวัสดุนานยนต์

ดร.กุลวดี	สังข์สนิท
ผศ.ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์
ผศ. วรณศิริ	จักรบุตร

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2555

**การเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโพลิเอทิลีน/อีลาสโตเมอร์/
นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้งานด้านวัสดุนยนต์**
**(Preparation and Properties of ternary polyolefin/elastomer/
nano-CaCO₃ composites use for automobile materials)**

โดย

ดร.กฤตติ	สังข์สนิท	หัวหน้าโครงการ
ผศ.ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	ผู้วิจัยหลัก
ผศ. วรณศิริ	จักรบุตร	ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2555

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	2
บทที่ 1 บทนำ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	50
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	63
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	75
กิตติกรรมประกาศ	76
ภาคผนวก เอกสารตีพิมพ์เผยแพร่	77
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	83
ภาคผนวก ค	92

ส่วนที่ 1 รายละเอียดโครงการ

1. ชื่อโครงการวิจัย การเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโพลิเอทิลีน/อีลาสโตเมอร์/นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้งานด้านวัสดุยานยนต์ (Preparation and Properties of ternary polyolefin/elastomer/nano-CaCO₃ composites use for automobile materials)

2. หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัย และสถานที่ตั้งพร้อมทั้งชื่อหน่วยงานและลักษณะของการร่วมงานวิจัยกับหน่วยงานอื่น (ถ้ามี)

หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต. คลอง 6 อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0-2549-3484-5 โทรสาร 0-2549-3480

หน่วยงานวิจัยร่วม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัย และสัดส่วนที่ทำการวิจัย (%)

หัวหน้าโครงการ

ดร.กุลวดี สังข์สนธิ	สัดส่วนที่ทำวิจัย	40%
(Dr. Kullawadee Sungsanit)		

ผู้ร่วมวิจัย

ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์	สัดส่วนที่ทำวิจัย	35%
(Asst. Prof. Dr. Warunee Ariyawiriyanan)		

ผศ. วรณศิริ จักรบุตร	สัดส่วนที่ทำวิจัย	25%
(Asst. Prof. Waroonsiri Jakrabut)		

4. ประเภทของการวิจัย การวิจัยและพัฒนา

5. สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

ส่วนที่ 2 เนื้อหาโครงการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโอเลฟิน/อีลาสโตเมอร์/นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้งานด้านวัสดุยานยนต์ โดยทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตผสมแบบสามเฟสระหว่างโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP), โพลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (Polyolefin elastomer, POE) สารตัวเติมอนินทรีย์คือ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-calcium carbonate, NC) และสารเชื่อมประสานคือ (Polyolefin elastomer-G, POE-G) โดยออกแบบสูตรวัสดุคอมโพสิตคือ PP/POE (95/5) ทำการแปรปริมาณของ NC เป็น 2.5, 5 และ 7 phr ตามลำดับ และมีการเติมด้วย POE-G ในปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ โดยใช้กระบวนการบดผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) นำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อน (Compression molding) เป็นแผ่นทดสอบชิ้นงาน และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลและค่าดัชนีการไหลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมด้วย POE และ NC ลงใน PP ทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลงจาก 3.8 g/10 min เป็น 3.6 g/10 min แต่เมื่อผสมด้วย POE-G ในปริมาณ 1-5 phr ลงใน PP/POE/NC (95/5/2.5) ส่งผลให้โพลิเมอร์มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเข้ากันได้ของโพลิเมอร์ ค่าการทนต่อแรงกระแทก (Impact) พบว่า เมื่อเติมด้วย POE และ NC ลงใน PP ทำให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกลดลงแต่เมื่อผสมด้วย POE-G ในปริมาณเพียง 3 phr ลงใน PP/POE/NC (95/5/2.5) ส่งผลให้วัสดุนี้มีค่าการทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจาก 80 J/m เป็น 93 J/m สารประสานดังกล่าวส่งผลอย่างมากต่อสมบัตินี้ และค่าความแข็งที่ผิวหน้ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน การเติมด้วย POE-G ไม่ส่งผลต่อสมบัติด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) กล่าวคือค่าการทนต่อแรงดึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นนัยสำคัญ ในขณะที่ค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) เมื่อเติมด้วย POE และ NC ลงใน PP ทำให้ค่ายังมอดุลัสเพิ่มขึ้นจาก 1,006 MPa เป็น 1,019 MPa แต่เมื่อผสมด้วย POE-G ในปริมาณ 1-5 phr ลงใน PP/POE/NC (95/5/2.5) ส่งผลให้ค่ายังมอดุลัสค่อยๆ ลดลงตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าปริมาณของ POE-G ที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างมากที่สุดเมื่อมีแรงมากระทำคือ 1 phr ทำให้โพลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีกว่า

คำสำคัญ วัสดุคอมโพสิต โพลิโพรพิลีน โพลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุนาโนคอมโพสิต (Nanocomposite materials) เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในปัจจุบันทั้งในงานวิจัยและการตลาดเนื่องจากความสามารถในการผลิตเป็นวัสดุชนิดใหม่ๆที่มีสมบัติที่ดีและเฉพาะด้านได้ง่าย เมื่อเทียบกับโพลิเมอร์ที่เป็นโฮโมโพลิเมอร์ (Homopolymer) หรือโพลิเมอร์ที่มีการเติมด้วยสารเติมแต่งอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ โพลิเมอร์นาโนคอมโพสิตจะมีสมบัติที่ดีและโดดเด่นกว่า ทั้งความแข็งแรง การทนต่อแรงกระแทก การทนความร้อนเป็นต้น [1] รวมทั้งน้ำหนักเบาและขึ้นรูปได้ง่าย เพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ดีทั้งความแข็งแรง ความเหนียว จึงได้มีแนวคิดในการวิจัยในการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแบบสามเฟส (Ternary polymer composite) ที่มีส่วนของความยืดหยุ่นจากอีลาสโตเมอร์และส่วนแข็งแรงจากสารตัวเติมอนินทรีย์

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิตแบบสามเฟสโดยจะศึกษาการผสมกันของโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และโพลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์ (Polyolefin Elastomer, POE) และเสริมแรงด้วยสารตัวเติมอนินทรีย์คือ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano calcium carbonate, Nano- CaCO_3) โดยมีแนวคิดว่าการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแบบสามเฟสที่เติมด้วยสารเติมแต่งที่มีอนุภาคระดับไมโครจะก่อให้เกิดการแยกเฟสขึ้นในระดับไมโครเมตร แต่ถ้าอนุภาคไมโครที่เติมลงไปนี้ถูกแทนที่ด้วยอนุภาคนาโนที่เล็กกว่าเป็นระดับนาโนเมตร การแยกของเฟสน่าจะลดลงตามไปด้วยซึ่งส่งผลทำให้เพิ่มการเข้ากันได้ของวัสดุโพลิเมอร์และทำให้สมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแบบสามเฟส

1.2.2 ศึกษาสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างระดับไมโครและสมบัติของวัสดุนาโนคอมโพสิตแบบสามเฟส

1.2.3 ศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุนาโนคอมโพสิตแบบสามเฟส

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ ได้แก่ โพลีโพรพิลีน และ โพลีเอทิลีนออลาสโตเมอร์
- 1.3.2 สารตัวเติมที่ใช้ คือ นาโนเคลเซียมคาร์บอเนต
- 1.3.3 สารเชื่อมประสาน POE-G
- 1.3.4 การทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความแข็ง (Hardness testing) การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) และการทดสอบสมบัติการไหล (Melt Flow Index)

1.4 ผลสำเร็จของการวิจัยที่ได้รับ และหน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ความสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับคือ การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ที่ทนต่อความแข็งแรง ให้นำมาประยุกต์ใช้ได้จริง รวมถึงความรู้ในการถ่ายทอดไปยังผู้ใช้งานทางด้านวิศวกรรมพลาสติก วิศวกรรมยานยนต์ โดยงานวิจัยดังกล่าวจะเป็นการวิจัยองค์ความรู้ขั้นพื้นฐานและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวได้ในประเทศไทย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 ได้ศึกษาการผลิตวัสดุประเภทนาโนคอมโพสิตแบบสามเฟสที่มีความแข็งแรงสูง
- 1.5.2 ได้ความรู้เพื่อมาพัฒนาการผลิตวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ดีสามารถนำไปใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงที่ต้องการรับแรงมากๆ ได้มาตรฐานและเป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตขึ้นมาใช้เองในประเทศไทยได้
- 1.5.3 กลุ่มอุตสาหกรรมและหน่วยงานเป้าหมาย เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์
- 1.5.4 สร้างผลงานวิจัยซึ่งสามารถตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติอย่างน้อย

บัญชี 1

1.6 หน่วยงานกลุ่มเป้าหมายที่จะใช้ประโยชน์

- 1.6.1 อุตสาหกรรมพลาสติก
- 1.6.2 อุตสาหกรรมยานยนต์

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม (สารสนเทศ/Information) ที่เกี่ยวข้อง

พรสุดาและคณะ[1] ได้ทำการศึกษา และวิจัยคอมโพสิตสามัญภาคของโพลีโพรลีน, อีลาสโตเมอร์ และแคลเซียมคาร์บอเนตฟิลเลอร์ โดยมุ่งเน้นถึงผลของชนิดและลักษณะของอีลาสโตเมอร์ และฟิลเลอร์ที่ใช้สัดส่วนในการผสม รวมถึงขั้นตอนในการผสมสารองค์ประกอบที่มีต่อ ลักษณะโครงสร้างเชิงจุลภาคและสมบัติเชิงกล ลักษณะโครงสร้างของคอมโพสิตได้ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค SEM, DMA, DSC และ XRD ในส่วนของสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่สมบัติในด้านการดึงและการกระแทก สมบัติเชิงกลที่ได้มีการนำมาวิเคราะห์ โดยใช้แบบจำลองทางทฤษฎีหลายรูปแบบ ผลการศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาคพบว่าลักษณะโครงสร้างของ คอมโพสิตสามัญภาค ที่เกิดขึ้นมีสองแบบคือ โครงสร้างที่อีลาสโตเมอร์และฟิลเลอร์กระจายตัวแยกกันในโพลีเมอร์หลัก (Separation) และโครงสร้างที่อนุภาคฟิลเลอร์ถูกหุ้มด้วยอีลาสโตเมอร์ (Encapsulation) จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะ โครงสร้างัญภาคได้แก่ สมบัติด้านพื้นผิวของสารองค์ประกอบที่ใช้ ส่วนปัจจัยรองได้แก่สัดส่วนและลำดับในการ ผสมสารองค์ประกอบ กล่าวคือการใช้เอทิลีน ไวนิลอะซีเตต (EVA) ซึ่งเป็นอีลาสโตเมอร์ ที่มีความเป็นขี้จะช่วยให้ได้คอมโพสิตที่มีโครงสร้างแบบ Encapsulation ในขณะที่การใช้ เอทิลีน-ออกทีนโคโพลิเมอร์ (EOR) ซึ่งไม่มีขี้จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Separation จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าคอมโพสิตที่ใช้เอทิลีน ไวนิลอะซีเตตเป็นอีลาสโตเมอร์ มีการยึดเกาะที่ดีระหว่างผิวอีลาสโตเมอร์ และฟิลเลอร์ทำให้มีค่าแรงเค้นดึงสูง ส่วนคอมโพสิตที่ใช้เอทิลีน-ออกทีนโคโพลิเมอร์มีค่าโมดูลัสและค่าการทนแรงกระแทก ที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ฟิลเลอร์ชนิดที่มีการเคลือบผิวด้วยสเตียริกแอซิด สามารถเพิ่มค่าการทนแรงกระแทกของคอมโพสิตได้มากกว่าการใช้ฟิลเลอร์ที่ไม่มีการ เคลือบผิว จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะ โครงสร้างและสมบัติของคอมโพสิตสาม ัญภาคสามารถควบคุมได้โดยการเลือกใช้สารองค์ประกอบและวิธีการผสมที่เหมาะสม

L. Szazdi และคณะ[2] ได้ทำการศึกษาโพลีโพรลีน เคลย์ คอมโพสิต ที่เตรียมด้วยปริมาณ/Silicate ที่แตกต่างกันไป 3 ชนิด โดย Silicate ที่เลือกใช้คือ Montmorillonite ซึ่งได้ถูกปรับปรุงและไม่ได้ถูกปรับปรุงให้เป็น Organophilic เพื่อทำการศึกษาสมบัติการกระจายตัวและสมบัติอื่นๆ ของวัสดุคอมโพสิตประเภทนี้ โดยโครงสร้างสัญญาณวิทยา (Morphology) ได้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) Scanning (SEM) และ Transmission Electron Microscope (TEM) และศึกษาสมบัติเชิงกล โดยวิเคราะห์สมบัติการดึงยึดของวัสดุ (Tensile properties) จากการวิเคราะห์ค่า Tensile yield stress ของ Composite จำนวนมาก พบว่าสมบัติเชิงกลมีความหลากหลายอยู่ในช่วงกว้าง เมื่อพิจารณาจากเทคนิค XRD และ TEM พบว่าไม่ปรากฏลักษณะที่แตกต่างของลักษณะการกระจายตัวแบบ Exfoliated ในขณะที่ PP/clay nanocomposites ที่ประกอบด้วย Maleinated PP สมบัติเชิงกลต่ำ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการกระจายตัวเป็นลักษณะ Exfoliation น้อยมาก ประมาณเพียง 8%

J.Z. Liang และคณะ[3] ได้ทำการศึกษาการคอมโพสิตระหว่าง นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano calcium carbonate, Nano-CaCO₃) และ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) สามารถเตรียมได้จากวิธีการทรีเมนต์ผิวอนุภาคของสารเติมแต่งนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 วิธีคือ SI (การกระตุ้นพื้นผิว) และ SII (การเข้าร่วมกับดิวาเนตเอเจนท์) สำหรับการกระจายตัวของอนุภาค นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในเมทริกซ์ของ โพลีโพรพิลีน จะถูกสังเกตด้วยเทคนิค Scanning Electron microscope (SEM) และอิทธิพลของการกระจายตัว จะประเมินได้จากรูป SEM ผลการทดลองพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในเมทริกซ์ของโพลีโพรพิลีน มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันละมีขนาดเล็กกว่า 1.5 ไมครอน นอกจากนี้ยังมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของอนุภาคได้ดีกว่าในพื้นที่ภายในของเมทริกซ์ โดยภายใต้สภาวะเดียวกันนี้ ความสามารถในการกระจายตัวของ SII จะดีกว่า

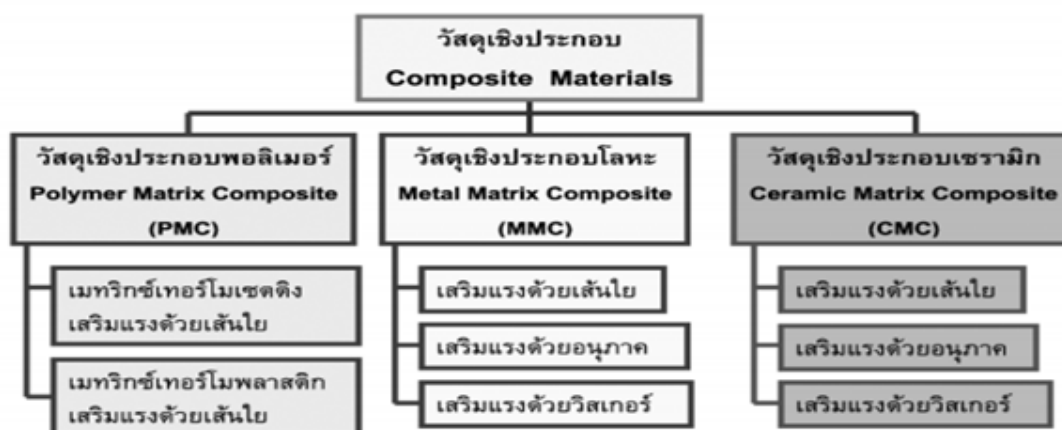
2.2 โพลีเมอร์เชิงประกอบ (Polymer composite)

โพลีเมอร์เชิงประกอบเป็นวัสดุที่มีหลายเฟส (Multiphase materials) ผลิตจากการผสมวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ 2 ชนิดหรือมากกว่า โดยมีโพลีเมอร์ที่เรียกว่าเป็นเมทริกซ์ (Matrix) เป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ผสมกับวัสดุเสริมแรง (Reinforcing agent) เพื่อผลิตวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลเด่นจากการผสมผสานสมบัติของวัสดุที่นำมาผสม เหตุผลในการผลิตโพลีเมอร์เชิงประกอบคือ ข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้โพลีเมอร์ในทางวิศวกรรม เนื่องจากโพลีเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าโลหะมาก กล่าวคือ มีค่าโมดูลัสต่ำกว่าประมาณ 100 เท่า และมีความแข็งแรงต่ำกว่าประมาณ 5 เท่า การผลิตวัสดุเชิงประกอบจึงเป็นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเพื่อการใช้งานในทางวิศวกรรมเป็นหลัก โดยการผลิตวัสดุที่มีความแข็งแรงพอๆ กับโลหะหรือสูงกว่า ซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานโพลีเมอร์เชิงประกอบในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักน้อย เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ เรือเดินสมุทร อุตสาหกรรมการผลิตยานอวกาศ อาวุธ การก่อสร้างอาคารสูง การขนส่งและใช้ในการผลิตเครื่องมือที่ทนต่อการกัดกร่อนสูง เป็นต้น

การผลิตโพลีเมอร์เชิงประกอบในอุตสาหกรรมทำกันมานานแล้ว โดยโพลีเมอร์เชิงประกอบชนิดแรกผลิตจากการใช้เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) เป็นตัวเสริมแรงเมทริกซ์ เรซินฟีนอลิก ต่อมาได้พัฒนาผลิตจากเมทริกซ์ที่เป็นเทอร์โมเซตชนิดอื่นๆ คือ เรซินยูรียาฟอว์มาลดีไฮด์ และเมลามีนฟอว์มาลดีไฮด์ ในช่วงต่อได้ผลิตโพลีเมอร์เชิงประกอบที่รู้จักกันมากที่สุดจนถึงปัจจุบัน คือไฟเบอร์กลาส (Fiberglass®) ซึ่งเป็นเครื่องหมายการค้าของโพลีเมอร์เชิงประกอบที่ผลิตจากการใช้เส้นใยแก้วเสริมแรงเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเอสเทอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester, UPE) ในปัจจุบันมีการผลิตโพลีเมอร์เชิงประกอบ ที่ใช้สารเสริมแรงที่เป็นผงละเอียด (Particulate reinforcement) และสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใย (Reinforcing fibers) โพลีเมอร์เชิงประกอบที่ผลิตจากการใช้เส้นใยชนิดต่างๆเป็นวัสดุเสริมแรง มีชื่อเรียกว่า พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic; FRP) ซึ่งวัสดุชนิดนี้มีการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ มากกว่าโพลีเมอร์เชิงประกอบประเภทแรกมาก

2.2.1 คอมโพสิต

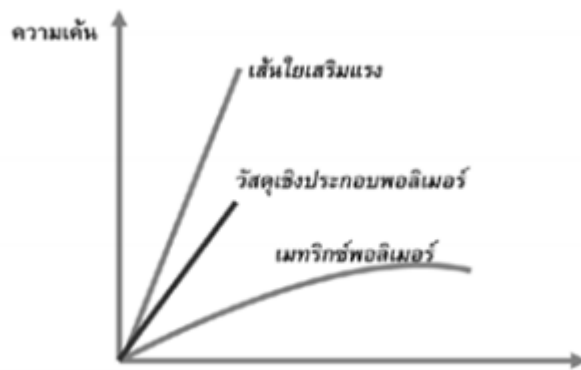
คอมโพสิต เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปเข้าด้วยกันโดยทั่วไป คอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (Matrix) และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement- materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับ วัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base materials) อย่างโลหะ เซรามิก หรือโพลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงโดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบโพลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถจำแนกย่อย ต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์ [3]

2.2.2 วัสดุเชิงประกอบโพลิเมอร์ (Polymer Matrix composite, PMC)

โดยธรรมชาติ โพลิเมอร์เป็นสารประกอบ อินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้โพลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่ สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนการเสริมแรงให้โพลิเมอร์ทำได้โดยการ เติมเส้นใยเสริมแรงลงใน โพลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบโพลิเมอร์มักเป็น เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับ และกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์โพลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำที่สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ[4]

ที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลอย่างง่าย ของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เมื่อให้แรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย สมบัติเชิงกลนี้จะเป็นสมบัติรวมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และสมบัติของเส้นใยเสริมแรง ประกอบกันทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรงสำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ สารเสริมแรง ในรูปอนุภาค มีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ากับรูปเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติม (Filler) วัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมาก

เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบมาใช้สำหรับงานโครงสร้างบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่ไม่ สูงมากนักได้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห และมีสมบัติแข็งเปราะ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล หรือการบ่มแล้วจะเกิดการคงรูปและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว มีสมบัติเหนียวและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม พฤติกรรมเชิงความร้อนนี้มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ สำหรับเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจะเป็นการผสมสารเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ ก่อนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแห และหลังจากที่ปฏิกิริยาลิ้นสุดวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการคงรูปซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ในขณะที่การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่ เมทริกซ์เป็นเทอร์โมพลาสติกนั้น จะใช้หลักการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว และขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัว

ลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยถ้าหลังจากคงรูปแล้วได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก การที่จะเลือกใช้เมทริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับ สมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ ในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบ วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตอาจอยู่ในรูปของชิ้นงานสำเร็จ หรือพรีเพรก (Prepreg) เพื่อความสะดวกในการขึ้นรูป ถ้าเป็นพรีเพรกของวัสดุเชิงประกอบ เมทริกซ์เทอร์โมเซตติงจะเป็นเส้นใยที่อยู่ใน เมทริกซ์เทอร์โมเซตติง แต่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเพียงบางส่วนเท่านั้น และเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นรูปร่างที่ต้องการแล้วจึงจะ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลที่สมบูรณ์ พรีเพรกลักษณะนี้อาจมาในรูปแบบแผ่น ที่เรียกว่า พรีเพรกผสมเสร็จแบบแผ่น (Sheet molding compound, SMC) สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะแผ่น และพรีเพรกผสมเสร็จแบบหนา (Bulk molding compound, BMC) จะใช้สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีรูปทรง ความแตกต่างกันของพรีเพรกทั้งสองชนิดจะอยู่ที่ความยาวของเส้นใยเสริมแรง และความหนืดของเมทริกซ์ พรีเพรกแบบแผ่น มักจะทำจากเส้นใยยาวและมีความสามารถในการไหลสูง ใหลของเมทริกซ์น้อยกว่า ส่วนพรีเพรกแบบหนามักจะทำจากเส้นใยสั้น และความสามารถในการไหลสูง เพื่อความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน

สำหรับพรีเพรกของวัสดุเชิงประกอบ เทอร์โมพลาสติกนั้น จะอยู่ในรูปแบบที่เป็นเส้นใยแก้วสั้นๆ ในเมทริกซ์พอลิโอฟีน ที่เรียกว่า พรีเพรกผืนแก้วเทอร์โมพลาสติก (Glass mat thermoplastic, GMT) โดยพรีเพรกเมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวของเมทริกซ์ และทำให้เป็นรูปร่างที่ต้องการ ก่อนที่จะถูกทำให้เย็นตัวลงและคงรูป ไฟเบอร์กลาสส์หรือไฟเบอร์ เป็นตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์ที่มีเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่มีส่วนแบ่งทางการตลาดสูง โดยทั่วไปหมายถึงเมทริกซ์ พอลิเอสเทอร์หรือไวนิลเอสเทอร์ ไฟเบอร์กลาสส์จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลาง น้ำหนักเบา เช่น หลังคาถาวรกระเบะ เฟอร์นิเจอร์ขนาดเล็ก เป็นต้น ส่วนเมทริกซ์ อีพอกซีจะถูกใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรง สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีการนำเส้นใยเสริมแรงอื่น ๆ ได้แก่ เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิด และมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยแก้วมาใช้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงสูงมาก ส่วนวัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติกมีส่วนแบ่งทางการตลาดน้อยกว่า มักใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียวทนทาน หรือนำไปอัดซ้อนกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์คอมโพสิตที่พบเห็นได้ง่ายของคอมโพสิตกลุ่มนี้คือ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก “ไฟเบอร์กลาส” ต่าง ๆ โพลีเมอร์คอมโพสิตมี โพลีเมอร์ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก หรือยางเป็นเนื้อหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวด โลหะ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโพลีเมอร์คอมโพสิต [5]

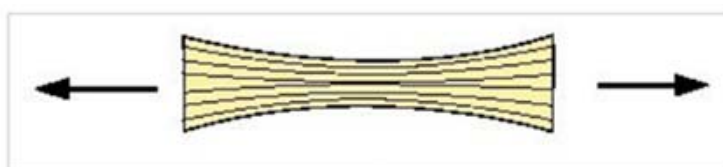
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

- สมบัติของเส้นใยเสริมแรง และสมบัติของโพลีเมอร์(เรซิน)

สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fibre Volume Fraction , FVF) เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรงมักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าโพลีเมอร์ ดังนั้นหากคอมโพสิตมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับโพลีเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงควรมีเนื้อโพลีเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่า แฮนด์เลย์อัพ (Hand lay-up) ซึ่งจะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 30-40% แตกต่างจากชิ้นงานคอมโพสิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงจะมีสัดส่วนของเส้นใยประมาณ 70% การจัดเรียงตัว (Orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของ คอมโพสิตที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาตั้งแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

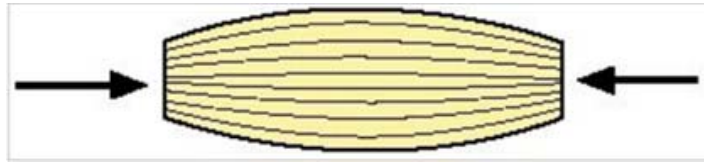
- การรับแรงของวัตถุ โดยทั่วไปแรงที่กระทำต่อวัตถุมีด้วยกัน 4 ประเภทคือ

1. แรงดึง (Tension) แสดงลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อคอมโพสิต การตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุขึ้นอยู่กับแรงดึงและความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใยเสริมแรงที่ใช้



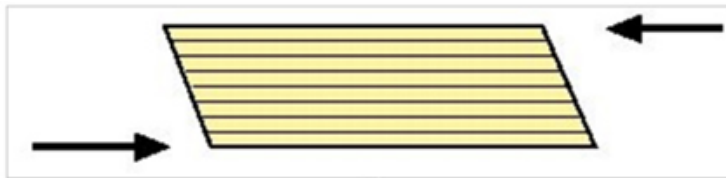
รูปที่ 2.4 แรงดึง (Tension) [3]

2. แรงกดอัด (Compression) แสดงลักษณะคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัด ในสภาพนี้ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นกับสมบัติความแข็งแรงดิ่ง และการยึดติด (Adhesion) ของเนื้อโพลีเมอร์เป็นหลัก เนื่องจากโพลีเมอร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงให้อยู่ในลักษณะเส้นตรงและป้องกันไม่ให้เส้นใยโค้งงอ



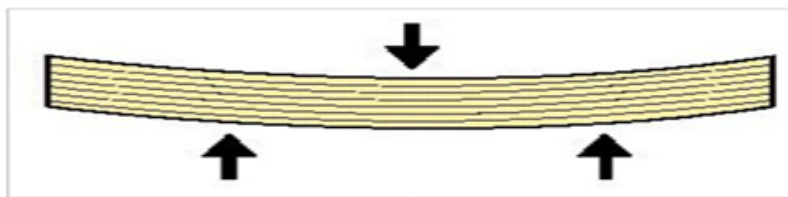
รูปที่ 2.5 แรงกดอัด (Compression) [3]

3. แรงเฉือน (Shear) ลักษณะแรงที่กระทำต่อคอมโพสิตมีทิศทางตรงข้ามกัน และแนวแรงอยู่ต่างระดับกัน ดังรูปที่ 2.6 ภายใต้สภาวะแบบนี้โพลิเมอร์จะมีบทบาทอย่างมากในเรื่องการยึดติดกับเส้นใยเสริมแรงไม่ใช่ในเรื่องสมบัติความแข็งแรงเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน คอมโพสิตที่มีการเรียงเส้นใยเสริมแรงเป็นชั้น ๆ



รูปที่ 2.6 แรงเฉือน (Shear) [3]

4. แรงดัด (Flexure) ลักษณะของแรงที่กระทำกับวัตถุมีลักษณะผสมของแรงดึง แรงเฉือน และแรงกดอัด 3 แรงเข้าด้วยกัน จากรูปที่ 2.7 เห็นได้ว่ากึ่งกลางของด้านบนของวัตถุถูกแรงกดอัดกระทำ ขณะที่ใต้วัตถุจะถูกแรงยืดและแรงเฉือนจากการยึดตัวของวัตถุ

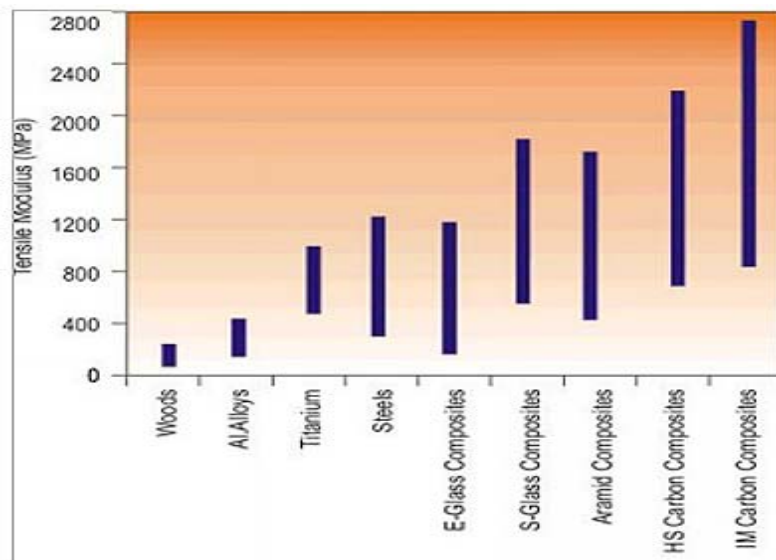


รูปที่ 2.7 แรงดัด (Flexure) [3]

การคอมโพสิตกับวัสดุอื่น เมื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตทั้ง 4 ข้อแล้ว ผู้ผลิตก็สามารถนำข้อมูลเหล่านั้นมาพิจารณาเลือกชนิดเส้นใยเสริมแรง และชนิดโพลิเมอร์ที่เหมาะสม รวมถึงทิศทางของแรงที่กระทำเพื่อจัดวางตำแหน่งเส้นใยเสริมแรงให้เหมาะสม เพื่อผลิตชิ้นงานคอมโพสิตออกมาให้ได้สมบัติเชิงกลตามต้องการ

รูปที่ 2.8 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติของคอมโพสิตกับวัสดุอื่นบางชนิด เส้นกราฟของคอมโพสิตแต่ละชนิดที่แสดงออกมาเป็นช่วงหมายถึง ค่าสมบัติเชิงกลขั้นต่ำและค่าสมบัติเชิงกลขั้นสูง โดยค่าสมบัติ

เชิงกลขั้นต่ำเป็นคอมโพสิตที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีทั่วไป เช่น วิธีการขึ้นรูปแบบแซนด์เลย์อัฟ ส่วนค่าสมบัติเชิงกลขั้นสูงเป็นค่าที่ได้จากคอมโพสิตที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีระดับสูง อย่างชิ้นงานคอมโพสิตที่ใช้กับอุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี autoclave moulding เป็นต้น



รูปที่ 2.8 กราฟเปรียบเทียบสมบัติของคอมโพสิตกับวัสดุอื่นบางชนิด [3]

2.2.6 การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบ

สมบัติของวัสดุเชิงประกอบสามารถออกแบบได้จากวัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนระหว่างวัสดุองค์ประกอบ ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุ องค์ประกอบ การเรียงตัวของสารเสริมแรงและการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้มีส่วนทำให้สมบัติของวัสดุ เชิงประกอบเป็นไปตามต้องการ ทำให้วัสดุเชิงประกอบสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายสาขา คลอบคลุมตั้งแต่วัสดุสำหรับการใช้งานทั่วไป จนกระทั่งถึงวัสดุที่ใช้ในงาน เฉพาะกิจที่ต้องการสมบัติพิเศษมาก ๆ

การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบด้านต่างๆ วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุสำคัญในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เส้นใยแก้วที่ถูกพัฒนามาพิเศษเพื่อการเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ซีเมนต์ หรือการใช้คอนกรีตที่เกิดจากซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและถั่วลอยทำให้เกิดเป็นคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา ด้านวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์ ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างที่รับแรงโดยตรง แต่มักใช้ประกอบกับวัสดุโครงสร้างเดิมเพื่อเสริมประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุเชิงประกอบโลหะที่เป็นอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงเมทริกซ์อะลูมิเนียมจะนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการทำฮาร์ดดิสก์ เพราะสามารถออกแบบให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้โดยการปรับสัดส่วนของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ วัสดุเชิงประกอบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอีกหลายๆ ด้าน ซึ่งพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น หมวกนิรภัย กระดานโต้คลื่น ไม้เทนนิส ไม้กอล์ฟ เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบเป็นการนำเอาสมบัติที่ดีของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดมาผนวกกันทำให้เกิดเป็นสมบัติที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานตามความต้องการของมนุษย์ โพลีเมอร์มีข้อจำกัดในด้านความแข็งแรง การเสริมแรงเมทริกซ์โพลีเมอร์ด้วยเส้นใยเสริมแรงจึงเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโพลีเมอร์อย่างมาก โลหะมีข้อจำกัดในด้านความทนทานต่อความล้า การใส่สารเสริมแรงลงไปในเมทริกซ์โลหะ- ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความทนทานต่อการใช้งานมากขึ้น สำหรับเซรามิกที่สมบัติทั่วไป คือ เปราะและแตกหักง่าย สารเสริมแรงที่ถูกใส่ลงในเมทริกซ์ เซรามิกสามารถหน่วงการแตกที่เกิดขึ้นได้ ทำให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความเหนียวทนทานมากขึ้น

การปรับเปลี่ยนชนิดของวัสดุองค์ประกอบ หรือสัดส่วนการผสม ทำให้เกิดสมบัติที่หลากหลาย และสามารถออกแบบให้เป็นไปตามต้องการได้ ปัจจุบันวัสดุเชิงประกอบนับได้ว่าเป็นวัสดุที่ใช้งานทั่วไป ครอบคลุมอุตสาหกรรมหลักต่างๆ ตั้งแต่ อวกาศยาน ยานยนต์ การก่อสร้าง ตลอดจนถึงอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การวิจัยและพัฒนาด้านวัสดุเชิงประกอบยังมีความจำเป็นที่ต้องดำเนินต่อไป เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีขึ้นเหมาะกับการใช้งานมากขึ้นและเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ต่อไป

2.2.7 เมทริกซ์ (Matrix Materials)

โพลีเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่เป็นเทอร์โมเซต ตัวที่ใช้กันมากที่สุดตัวหนึ่ง คือ พอลิเอสเตอร์ที่อิมไมด์ (UPE) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเทอร์โมเซตพอลิเอสเตอร์ เนื่องจากโพลีเมอร์ชนิดนี้ผลิตได้ง่าย ราคาถูก นิยมใช้ในการผลิตโพลีเมอร์เชิงประกอบที่ใช้เป็นเส้นใยเสริมแรง เพื่อใช้ในการผลิตถังเก็บน้ำและสารเคมีขนาดใหญ่ ท่อขนาดใหญ่ กระดุกของเรือ ทำที่นั่งในสนามกีฬา สถานีขนส่งและที่ป้ายรถเมล์ เป็นต้น เทอร์โมเซตอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในปริมาณสูงเช่นกัน คือ เรซินอีพอกซี ซึ่งจะผลิตวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าเทอร์โมเซตชนิดแรก โดยเฉพาะความเหนียว แต่มีราคาแพงกว่าวัสดุที่ผลิตจาก UPE สาเหตุที่นิยมใช้เทอร์โมเซตเป็นเมทริกซ์ เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

- เนื่องจากก่อนการเชื่อมโยงเมทริกซ์จะอยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ทำให้สามารถเข้ากันได้ดีกับการเสริมแรง ก่อนที่จะนำไปอบเพื่อให้เรซินแข็งตัว

- ทำการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ง่าย

- สามารถผลิตวัสดุที่มีอุณหภูมิการอ่อนตัวสูง จากการลงทุนที่ไม่สูง

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาใช้เทอร์โมพลาสติกเป็นเมทริกซ์ ตัวอย่างของพลาสติกที่ใช้กันมาก คือ พลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึก (Semi-crystalline polymers) เช่น PP และ ไนลอน เป็นต้น ข้อได้เปรียบของการใช้เทอร์โมพลาสติกเหนือเทอร์โมเซต คือ สามารถแปรรูปโดยเทคนิคการฉีดและการอัดรีดที่ใช้กันทั่วไปได้ ซึ่งทำให้ลดต้นทุนในการแปรรูป จะต้องพิจารณาถึงผลของการเสริมแรงที่ผสมเข้าไป เนื่องจากทำให้ความหนืดของโพลีเมอร์หลอมเพิ่มขึ้นและทำให้เครื่องแปรรูปสึกหรอได้ง่ายเนื่องจากความมีเหลี่ยมคมของสารเสริมแรงบางชนิด เช่น เส้นใยแก้วสั้น (Chopped strand glass fiber) และซิลิกา เป็นต้น ดังนั้นในบางกรณีจึงมีการออกแบบเครื่องมือสำหรับแปรรูปโพลีเมอร์ชนิดนี้โดยเฉพาะ

เทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆที่นิยมนำมาใช้เป็นเมทริกซ์ เช่น โพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone, PEEK) เป็นโพลิเมอร์ที่ทนต่อแรงกระแทกและทนต่อตัวทำละลายดีมาก นอกจากนี้มีการใช้โพลิอิมิด (Polyimide, PI) ที่เป็นทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ในการผลิตวัสดุใช้สำหรับอุตสาหกรรมยานอวกาศ เทอร์โมพลาสติก PI จะแปรรูปได้ง่ายและทนต่อความร้อนสูง ส่วนเทอร์โมเซต PI จะมีความเหนียวสูง โพลิสัลโฟน (Polysulfone, PSU) ก็เป็นเทอร์โมพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจใช้เป็นเมทริกซ์ ตัวอย่างสมบัติของเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก ที่นิยมนำมาใช้เป็นเมทริกซ์

2.2.8 วัสดุเสริมแรง (Reinforcements)

วัสดุเสริมแรงที่ใช้ในการผลิตโพลิเมอร์เชิงประกอบแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. วัสดุเสริมแรงชนิดผงละเอียด (Particulate reinforcement) มักจะเป็นสารตัวเติมจากสินแร่ (เช่น ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น) ผงโลหะ แก้วเม็ดกลมและสารตัวเติมอินทรีย์ (เช่น ผงไม้และผงถ่าน เป็นต้น)

2. วัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใย (Fiber reinforcement) โดยเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิดและเส้นใยโลหะ เป็นต้น

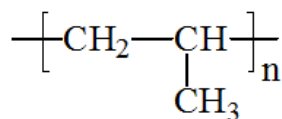
การเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างเมทริกซ์กับวัสดุเสริมแรงคือ การใช้วัสดุเสริมแรงกับเมทริกซ์เพื่อผลิตโพลิเมอร์เชิงประกอบ เพื่อที่จะให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มแรงดึงดูด (Adhesion) ที่ผิวของเฟส ทั้งสอง การใช้สารเสริมแรงอินทรีย์บางประเภทที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิว เช่น เส้นใยแก้ว ซิลิกา แก้วเม็ดกลม เป็นต้น ไม่สามารถเกิดพันธะเคมีหรือแรงดึงดูดกับพลาสติกโดยเฉพาะเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่ได้ เนื่องจากการมีธรรมชาติทางเคมี ที่ต่างกัน นอกจากนี้สารประเภทนี้มักจะดูดความชื้นและทำให้เกิดการสะสมน้ำที่ผิวประจัญ ส่งผลให้สูญเสียสมบัติอย่างแรงภายใต้สภาวะที่มีความชื้น ด้วยเหตุนี้ จึงนิยมนำสารเคมีอีกกลุ่มหนึ่ง ที่มีชื่อเรียกว่าสารเชื่อมประสาน (Coupling agents) เคลือบสารเสริมแรงที่เป็นทั้งชนิดผงละเอียดและเส้นใย ก่อนที่จะทำการผสมกับเมทริกซ์โพลิเมอร์ สารเชื่อมประสานที่ใช้กันมากที่สุดมี 2 ชนิด คือ สารประกอบของซิลเลน (Silane) และไททาเนต (Titanate) ซึ่งมีความสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับทั้งผิวของโพลิเมอร์และสารเสริมแรง

2.3 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

2.3.1 ประวัติของโพลีโพรพิลีน

โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1957 จากโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่างๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามโครงสร้างของโพลีโพรพิลีน ได้แก่ ไอโซแทกติก โพลีโพรพิลีน ซินดิโอแทกติกโพลีโพรพิลีน และแอแทกติก

กติกโพลิโพรลีน มีสมบัติดีกว่าโพลิเอทิลีนหลายอย่าง ได้แก่ ทนแรงกระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120 °C

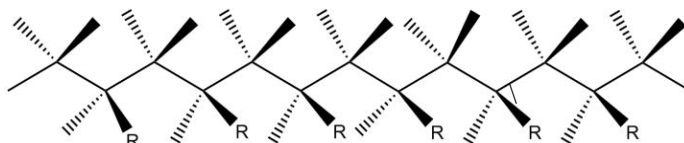


รูปที่ 2.9 โครงสร้างโพลิโพรลีน [2]

Natta แห่งอิตาลีได้ศึกษางานของ Ziegler เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับความดันและความร้อนต่ำ ในการสังเคราะห์ HDPE เขาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวทำให้เกิดโพรพิลีน (C_3H_6) ซึ่งหนักกว่าแก๊สเอทิลีน (C_2H_4) กลายเป็นโพลิโพรลีน (PP)

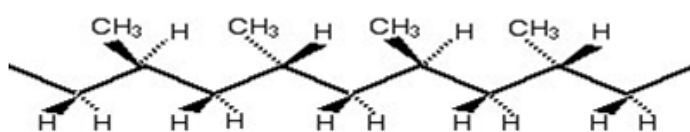
โพลิโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบเชิงเส้น ปราศจากกิ่งก้านสาขาแยกจาก ลำตัว เนื่องจากโมเลกุลของโพรพิลีนมีหมู่เมทิล $-\text{CH}_3$ ต่อกับอะตอมของคาร์บอนต (รงพันธะคู่เมื่อเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันจึงอาจเกิดผลิตภัณฑ์ได้ 3 แบบดังนี้

1. แบบไอโซแทกติก)Isotactic(



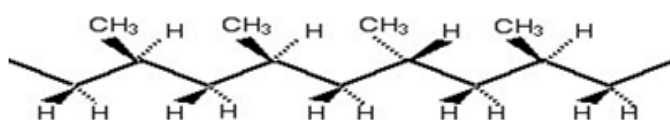
รูปที่ 2.10 แบบไอโซแทกติก)Isotactic([2]

2. แบบซินดิโอแทกติก)Syndiotactic(



รูปที่ 2.11 แบบซินดิโอแทกติก)Syndiotactic([2]

3. แบบอะแทกติก)Atactic(



รูปที่ 2.12 แบบอะแทกติก)Atactic([2]

การผลิต PP ให้มีโครงสร้างแบบเป็นไอโซแทกติก เป็นสิ่งที่ผู้ผลิตต้องการเพราะจะทำให้ PP มีสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็งตึง และความทนความร้อน เป็นต้น

2.3.2 การสังเคราะห์

การสังเคราะห์โดยกระบวนการ) "สเฟียริพอล" Spheripol ของไฮมอนท์ สหรัฐอเมริกาเป็น (เทคโนโลยีที่สามารถควบคุมอัตราการเกิดและการจัดตัวให้ได้ PP ที่มีแทกติซิตี (Tacticity) สูง ทั้งนี้เนื่องจาก (ความสำเร็จในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอแนคตา) Ziegler-Natta catalyst นอกจากนี้ (PP ที่ผลิตได้มีลักษณะเม็ดกลม จึงไม่ต้องผ่านการตัดเม็ดอีก

การผลิต PP ด้วย "gas phase process จากเทคโนโลยีของ "Union Carbide และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท Shell จะใช้ขั้นตอนน้อย และไม่จำเป็นต้องกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการสังเคราะห์ เนื่องจากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความไวสูงมาก

2.3.3 สมบัติทั่วไป

PP มีความหนาแน่น $0.91 - 0.92 \text{ g/cm}^3$ หมู่เมทิลทำให้โมเลกุลอยู่ห่างกัน แต่ยังคงมีความแข็งแรงสูง จุดอ่อนของ PP คือ จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 0°C และเสถียรภาพของ (PP ต่อแสงอัลตราไวโอเลต และออกซิเจนจะต่ำกว่า PE จึงไม่เหมาะสมใช้งานกลางแจ้ง เนื่องจาก แสงอัลตราไวโอเลตจะทำให้เปราะ แตกร้าว สีซีดจางได้ง่าย ดังนั้น ก่อนนำ PP ไปใช้งาน ต้องใส่สารแอนติออกซิแดนต์ (stabilizer) อื่นๆ (จุดเด่นของ PP คือ สมบัติเชิงกลดีมาก เช่น มีความทนทานแรงดึงสูง จุดหลอมเหลวสูงกว่า PE เหมาะกับงานอุณหภูมิสูง ทนอุณหภูมิน้ำเดือดได้ ใช้ทำถุงน้ำร้อน นอกจากนี้ PP ยังทนไขมันและน้ำมันได้ดี ส่วนไอน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำกว่า PE และยังใสกว่า PE



รูปที่ 2.13 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก โพลีโพรพิลีน) Polypropylene, PP] (2]

2.3.4 การใช้งานของ PP

1. งานฉีดแบบ)Injection molding(ใช้ทำกล่องเบตเตอรี ถังน้ำมันในรถยนต์ กันชนรถยนต์ ถังใส่ขวด กระถางต้นไม้ ของเด็กเล่น ค้ำแปรงสีฟัน ฝาจุกลพลาสติก เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ทางการแพทย์ เช่น กระบอกฉีดยาใช้ครั้งเดียวทิ้ง

2. งานเป่า)Blow molding ใช้ทำผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับ (HDPE เช่น ขวด ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานสูง

3. งานสิ่งทอ)Textileซึ่งต้องการความแข็งแรงสูง แต่ยืดน้อย รับแรงมาก ๆ ได้ ใช้ทำเส้นใย (กระสอบสาน เชือกฟาง แห อวนผ้าใบปกป้องพืชสวน

4. งานเป่าถุง)Blown film (งานเป่าถุงระบายความร้อนด้วยน้ำ ทำให้มีฟิล์มใส เนื่องจากเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีสัดส่วนที่เป็นอสัณฐานมากเกิดผลลึกลึกน้อย แต่ความแข็งแรง จะเสียไปบ้าง ใช้ทำพลาสติกหุ้มซองบุหรี่ ซองใส่เสื้อเชิ้ต ถุงร้อน,ถุงเย็น งานเป่าถุงระบายความร้อนด้วยอากาศ จะค่อนข้างทึบแสง ขุ่นเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลมีโอกาสดัดเรียงตัวได้มากกว่าในระหว่างที่อุณหภูมิผ่าน T_m และ T_g จึงมีความแข็งแรง และมีความทนแรงดึงสูง OPP)ORIENTED PP หรือ (BOPP)BI-AXIALLY ORIENTATION PP (ฟิล์ม BOPP ใส และบางทำจากฟิล์ม PP ที่ผ่านกรรมวิธีความร้อนจนใกล้จุดหลอมเหลวแล้วนำไปดึง)Stretch เพื่อให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวในแนวนอน (MD)Machine direction () แล้วถ่างTenterในแนว (TD) Transverse directionได้ฟิล์มหนากว้างที่บางและใส ประหยัดเม็ดพลาสติก (เพิ่มความสามารถด้านการสกัดกั้นไอน้ำและออกซิเจน ฟิล์ม BOPP ทำจากฟิล์มเป่า)Blown filmหรือจาก () ฟิล์มรีดเป็นแผ่นFlat film หรือ T-die casting film โดยนำมาให้ความร้อนอีกครั้ง แล้วเข้าเครื่องดึง (ตามยาว ด้วยการเดินลูกกลิ้งม้วนเก็บความเร็วว่าลูกกลิ้งส่งฟิล์ม ที่อุณหภูมิระหว่างจุดหลอมเหลวและจุดอ่อนตัวไวแคท MD)TD โดยลูกกลิ้งม้วนเก็บความหนาที่ชิด และมีอุณหภูมิต่ำเพื่อลดความยาวที่ชิด (ตามแนวMD มีการเรียงตัวของโมเลกุลจะไปตามแนว MD ฟิล์มจะบางลงและยาวขึ้น จากนั้นฟิล์มที่มีการเรียงตัวนี้เข้าเครื่องถ่างฟิล์มทางด้านกว้างด้วยหลักเดียวกัน คือ ให้ความร้อนคลายโมเลกุล โดยเฉพาะโมเลกุลที่ไม่มีการจัดตัวจะได้ผลกระทบมาก ในขณะที่โมเลกุลซึ่งมีการจัดตัวดี และยังมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลดี จะยังคงสามารถรักษาสภาพไว้จากนั้น จึงถ่างฟิล์มด้านกว้างด้วยระบบสานพานจับของถ่างออกในทางปฏิบัติอาจยึดทางด้านกว้าง)TD) ก่อนการยึดทางด้านยาว (MD ได้ (

หลังจากจัด T_D และ M_D แล้วควรอบเหนียว)Anneal ที่อุณหภูมิประมาณ (100°C โดยการดึงให้ตึงสักระยะหนึ่งเพื่อลดการหดตัว และเคลือบผิวหน้าด้วยไวนิลินไดคลอไรด์)Vinylendichloride, PVDC (เพื่อช่วยให้การผนึกฟิล์มด้วยความง่ายขึ้น แลเพิ่มสมบัติการสกัดกั้นให้สูงขึ้นการทำบรรจุภัณฑ์ชนิดฟิล์มหลายชั้นต้องมีฟิล์ม BOPP เป็นวัสดุสำคัญชั้นในหลาย ๆ ชั้นด้วยเสมอ สีเนื่องจากมีสมบัติที่ดีเยี่ยม ความทรงรูป ไม่ยืดหยุ่นในขณะที่นำไปผ่านขั้นตอนการพิมพ์สี มีความใสและความเป็นมันวาว ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้เป็นอย่างดี น้ำหนักเบา และราคาถูกกว่า พลาสติกชนิดอื่น แต่สมบัติที่เป็นจุดอ่อนของฟิล์ม BOPP คือไม่ต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ไม่ทนต่อไขมันและน้ำมัน ดังนั้น ในการผลิตบรรจุ

กันต่าง ๆ จึงต้องนำพลาสติกชนิดอื่นมาประกบเป็นชั้นบาง ๆ ที่พื้นผิวของฟิล์ม BOPP เพื่อเพิ่มสมบัติของฟิล์มที่ขาดหายไป เช่น การประกบ BOPP กับ PVDC ทำให้ได้ฟิล์มที่สามารถต้านการซึมผ่านของออกซิเจนได้ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากฟิล์ม BOPP เช่น ซองใส่อาหารสำเร็จรูป ซองใส่ถุงขนมขบเคี้ยว ขนมประเภทเบเกอรี่ เป็นต้น

2.3.5 โพรพิลีนโคโพลิเมอร์ (Propylene copolymers)

โพรพิลีนโคโพลิเมอร์ที่สำคัญในทางการค้ามีอยู่ 4 ชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีเอทิลีนเป็นโคมอนอเมอร์ทั้งสิ้น

1. โพรพิลีนโคโพลิเมอร์แบบสุ่ม (Propylene random copolymers) (ซึ่งได้จากการใส่ เอทิลีนปริมาณเล็กน้อย) 2.5% เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการโพลิ (เมโรไซเซชัน ผลที่ได้จากการเป็นโคโพลิเมอร์แบบคละ ซึ่งมีความใสและทนความเหนียวมากกว่า PP โฮโมโพลิเมอร์ แต่ความแข็งแรงจะลดลง

2. โพรพิลีนโคโพลิเมอร์แบบบล็อก (Propylene block copolymers) (หรือ Impact copolymer ซึ่งความจริงแล้ว PP จะถูกผสมกับ 25% เอทิลีน – โพรพิลีนโคโพลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์นี้ถูกผลิตโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ 2 เครื่อง โดย PP โฮโมโพลิเมอร์ จะถูกผลิตขึ้นภายใน Loop reactor แล้วจึงถูกป้อนเข้าสู่ gas phase reactor พร้อม ๆ กับโพรพิลีน และเอทิลีน ซึ่งโพรพิลีนและเอทิลีน จะโคโพลิเมอร์กันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังคงมีอยู่ภายในอนุภาคของ PP โฮโมโพลิเมอร์จนกลายเป็นโพลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง แทรกตัวอยู่ใน PP โฮโมโพลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ และสามารถผสมกับโฮโมโพลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า PP “Impact copolymer” สามารถทนแรงกระแทกและความทนแรงดึง “Tensile” น้อยกว่า ทั้งนี้เพราะ (PP impact copolymer) มีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยางเพิ่มมากขึ้น

3. โพลิเมอร์แบบคละของโพรพิลีนและเอทิลีน โดยโอเลฟินส์แต่ละชนิดมีปริมาณใกล้เคียงกัน จะได้วัสดุที่เรียกว่า ยางเอทิลีน-โพรพิลีน (Ethylene propylene rubber)

4. การผสมโพรพิลีนกับ 65% ยางเอทิลีน-โพรพิลีน และมักเรียกว่าเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers)

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PP Homopolymer กับ PP

Property	PP Homopolymer	40% filled polymer			
		Suzarex mica 200 np	Tal	Calcium Carbonate	30% Glass Fibers
Tensile strength)MPa(	32	43	30	19	43
Flexural strength) MPa(	31	65	44	32	70
Flexural modulus) MPa(	1240	7600	4700	2900	6400
Izod impact Strength)J/m(	Notched Unnotched	24 No break	35 2230	24 240	40 1200
Heat deflection Temperature At 264 psi	65	108	78	84	125

2.4 สมบัติของ เอทิลีน – แอลฟา – โอลิฟิน โคลิโพลิเมอร์ / พอลิโพรพิลีน ผสม

(Ethylene- α -olefin copolymer/polypropylene blends, POE-G /PP)

ผลกระทบขององค์ประกอบและชนิดของโคโพลิเมอร์ต่อพฤติกรรมการไหล รูปแบบโครงสร้าง และคุณสมบัติของ เอทิลีน – แอลฟา – โอลิฟิน โคลิโพลิเมอร์ / โพลีโพรพิลีน ผสม

สมบัติพฤติกรรมการไหล รูปแบบโครงสร้าง ทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของโพลีโพรพิลีน น้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเอทิลีน – แอลฟา – โอลิฟิน โคลิโพลิเมอร์ (EOC) ที่มีการตรวจสอบ การประเมินค่าของสมบัติพฤติกรรมการไหลของความร้อนของโพลิเมอร์ผสมเข้ากันไม่ได้ ทั้งในสถานะของแข็งและของเหลว การศึกษาคุณสมบัติการไหลที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการไหลของโพลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่อง Palierne emulsion model ค่าของผลที่ต่ำของแรงตึงผิวที่ต่ำเป็นตัวยืนยันการเข้ากันได้ระหว่างชั้นตอนได้เป็นอย่างดี

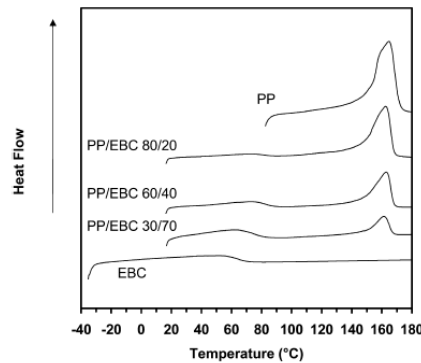
การเพิ่ม EOC เข้าไปใน PP มีผลอย่างมากในการปรับปรุงในการเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกสู่สมบัติคล้ายยางเข้ากันได้ด้วยขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงบิวทิลพื้นฐานจาก PE เป็นการพบที่มีประโยชน์เป็นอย่างมากในส่วนของการแตก

2.4.1 การศึกษาพฤติกรรมการไหล

สมบัติความหนืดคล้ายยางขององค์ประกอบบริสุทธิ์ ความแตกต่างที่กว้างในความหนืดที่ซับซ้อนเห็นได้เด่นชัดระหว่าง PP และ POE-G เนื่องจากมีความแตกต่างในน้ำหนักโมเลกุล EOC แสดงเด่นชัดมาก เนื่องจากอยู่ในรูปของสายโซ่แขนที่ยาว แขนสายโซ่ที่ยาวยังมีผลทำให้มีการเพิ่มความคล้าย

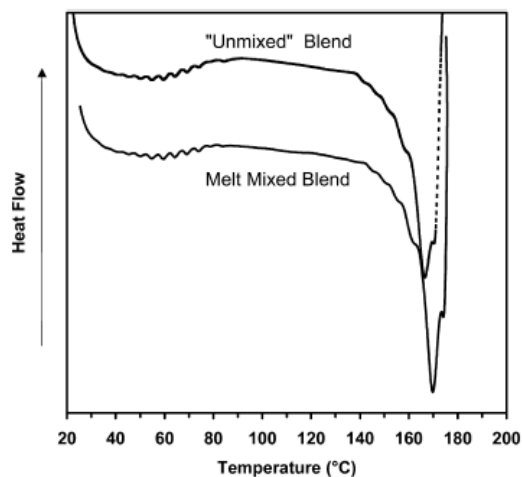
มากขึ้นด้วย โดยทั่วไปองค์ประกอบบริสุทธิ์และพฤติกรรมของผสมมีช่วงเวลาที่กว้าง relaxation time ของโพลิเมอร์ผสม EOC มีค่าที่สูงด้วยอัตราส่วน 30/70 (PP/EOC)

2.4.2 คุณสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 2.14 แสดงชนิดของ DSC สำหรับ PP/EBC [13]

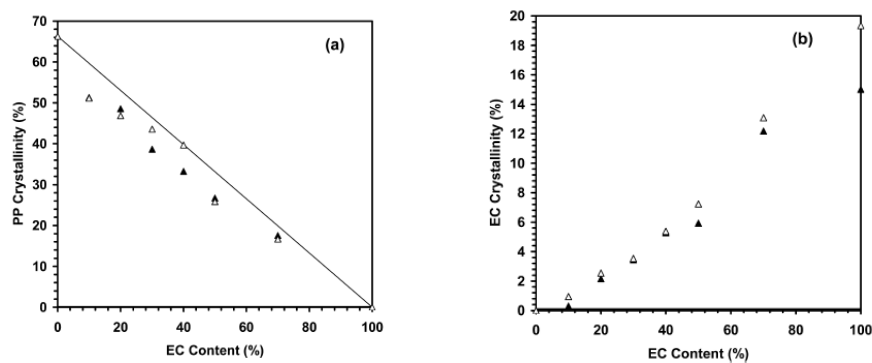
จากรูปที่ 2.14 แสดงชนิดของ DSC สำหรับ PP/ EBC ผสมและตารางที่ 3 สรุปการหลอมและอุณหภูมิที่เกิดเป็นผลึกของโพลิเมอร์ผสมทั้งหมด การที่ไม่สามารถตรวจหาพีคของ EC ที่ 90/10 (PP/EC) เนื่องจากความไม่พอเพียงของเครื่องมือตรวจวัดเพื่อแยกวิเคราะห์พีคที่มีความรุนแรงต่ำ ความสม่ำเสมอของจุดหลอมเหลวของ PP



รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบ DSC ของส่วนที่ไม่ผสมกัน [13]

จากรูปที่ 2.15 เป็นการเปรียบเทียบ DSC ของส่วนที่ไม่ผสมกัน ซึ่งเป็นการแสดงอีกครั้ง DSC มีการหลอมเหลวอย่างไร ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างส่วนประกอบของการหลอมผสม

เหตุผลกระทบของการเกิดนิวเคลียสเป็นเหตุมาจากการที่ PP เกิดเป็นผลึกระหว่างกระบวนการเกิดผลึกของขั้นตอน EC

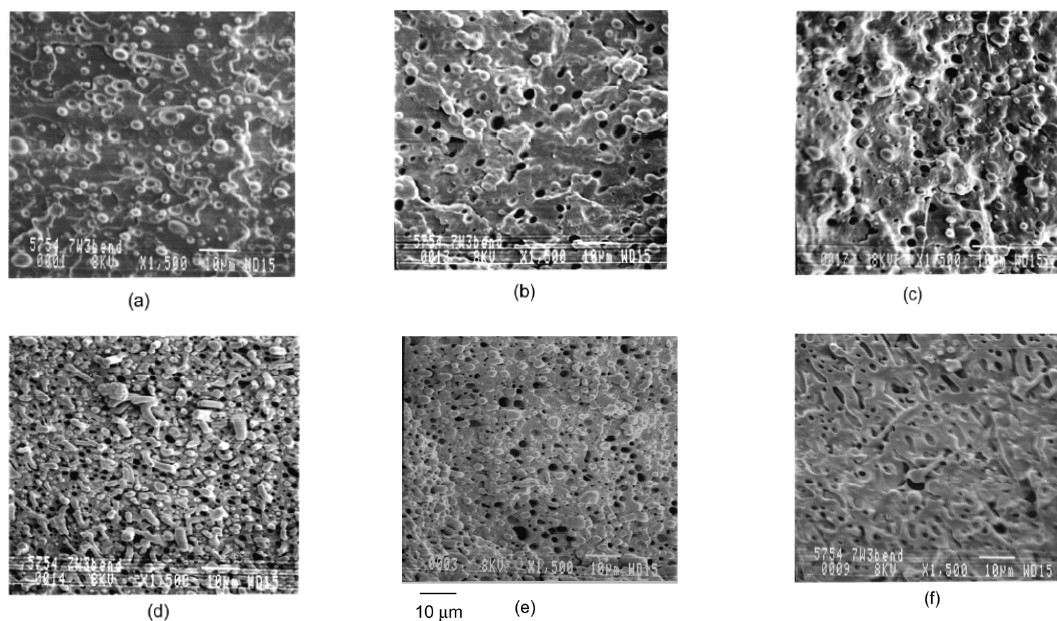


รูปที่ 2.16 (a) และ (b) เป็นการเปรียบเทียบผลึกของ PP และ EC ตามลำดับ [13]

จากรูปที่ 2.16 (a) และ (b) เป็นการเปรียบเทียบผลึกของ PP และ EC ตามลำดับ สำหรับส่วนประกอบที่สูง EOC มีความเป็นผลึกมากกว่า EBC ด้วยความหนาแน่นที่มาก

2.4.3 โครงสร้างและสมบัติทางกล

SEM รูปของ PP/EBC ผสมผลิตภัณฑ์ที่ใช้ขึ้นรูปคือ Tusin – screw extruder และ Reveal droplet – Mattix morphologies โดยเฉพาะอัตราส่วนผสมที่มีความหนืดสูงและลักษณะพิเศษ (9.2 สำหรับ PP/EBC และ 5.8 ของ PP/EOC) จำนวนที่ shear rate 100 s^{-1} ไม่มี Coalescence เกิดขึ้นและจำนวนของ EOC เพิ่มขึ้นเกี่ยวข้องกับรูปแบบการกระจายตัวที่พบกับขนาดการกระจายตัวเฉลี่ย จาก 1.3 ถึง $2 \mu\text{m}$ และการกระจายตัวไม่เพิ่มขึ้น 1.3 จำนวนและปริมาตร เส้นผ่านศูนย์กลางการเฉลี่ย D_n และ D_v ตามลำดับ สำหรับ PP/EC: 70/30 ของสองระบบสรุปใน ขนาดโดยทั่วไปใหญ่กว่าที่มีการรายงานมาก่อนหน้ากับความหนืดที่ลดลง [10, 14] และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางเฉลี่ยของ PP/EOC ที่สูงกว่าเล็กน้อย เฟสที่เปลี่ยนแปลงไปจะปรากฏเมื่อจำนวน EBC สูงกว่า 50% และ EBC กลายเป็นเฟสผสมที่ PP/EBC 30/70 ผลกระทบของการเพิ่ม EBC ต่อสมบัติทางกลของส่วนผสมตามลำดับ มีการแสดงสมบัติ ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยและรูปแบบการทำนายของ Paliene และ wv (70/30) ที่ 210°C



รูปที่ 2.17 ภาพ SEM ของ PP / EBC ผสมที่เตรียมโดยการอัดรีดสกรูคู่ (a) PP / EBC 90/10, (b) PP / EBC 80/20, (c) PP / EBC 70/30, (d) PP / EBC 60/40, (e) PP / EBC 50/50, (f) PP / EBC 30/70 [13]

ตารางที่ 2.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและรูปแบบการทำนายของ Paliene และ Wu (70/30) ที่ 210 ° C

	PP/EBC	PP/EOC
D_n (µm)	1.57	2.05
D_v (µm)	2.01	2.14
σ (N/m)	0.00064	0.0006
Viscosity ratio at 100_s^{-1}	9.15	5.6
D_n predicted by Eq. (4)	0.77	0.5

การเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วของสมบัติการทนแรงกระแทกและแรงดึงของส่วนผสมบางส่วนตามที่แสดงในรูปที่ 2.17 การเพิ่มขึ้นของจุดยืดขาด (Elongation at break) และพลังงานแรงกระแทกที่ 50/50 ขณะที่ไม่มีลิ่มเหลวปรากฏเหนือส่วนผสมนี้ เป็นผลจากการเปลี่ยนจากพลาสติก (Plastic) ไปเป็นอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) แสดงว่าส่วนผสมของ EBC ที่สูงกว่าซึ่งผลของ EBC ผสม ถึงแม้ว่าผลที่ได้สมบัติทางกลจะคล้ายกันที่ได้จาก PP/EOC ผสมเป็นที่สังเกตว่า EBC ปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในการปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกของ PP มากกว่า EOC ตัวอย่างเช่นที่ 30% POP, พลังงานกระแทกของ

PP/EOC เป็น 34% ต่ำกว่าที่ PP/EBC เมื่อโครงสร้างของโพลีเมอร์ผสมนี้คล้ายกันมาก พลังงานในการทนแรงกระแทกใน PP/EOC ผสม อาจเนื่องจากการเกิดผลึกที่สูงกว่า

การผสม PP ด้วย เอทิลีน – แอลฟา – บิวทีน และเอทิลีน – แอลฟา – ออกทีน โคลโพลิเมอร์ ซึ่งผสมเข้ากันไม่ได้ บนช่วงขององค์ประกอบในสถานะของเหลวและของแข็ง มีแรงดึงดูดระหว่างขั้นตอนทำให้เกิดการเข้ากันได้ ทางด้านทางกลที่ดีเยี่ยม ซึ่งรวมถึงการเข้าใจถึงความสำคัญของการพัฒนาในการเพิ่ม EOC เข้าไปในองค์ประกอบพีพี มีสารตั้งต้นที่ไม่แตกต่างในแรงดึงดูด, เพราะฉะนั้นการเข้ากันได้และขั้นตอนการเกาะติดระหว่างบิวทีน และระบบออกตะ

การศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกล เปลี่ยนจากพลาสติกไปเป็นการที่มีสมบัติคล้ายยาง สมบัติที่เกิดขึ้นช่วงประมาณ 50% องค์ประกอบที่ซึ่งเข้ากันได้สนิทกับขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลง ก่อนการนำไปใช้ในกระบวนการฉีด ที่มีความเครียดต่ำมากๆ ผลที่ได้ในข้อมูลของการยืดและอนุภาคนาโนไมโคร

2.5 โพลีเอทิลีน (PE)

โพลีเอทิลีน หมายถึง พอลิเอทิลีน ซึ่งมีระดับความเป็นผลึกและ ชนิดกรดต่างๆ) ความหนาแน่นแตกต่างกัน และ (โพลีโพรพิลีน เพื่อความสะดวกในการอธิบายจึงขอแบ่งโพลีเอทิลีน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 พอลิเอทิลีน (PE)

เป็นโพลีเมอร์ที่รู้จักกันมากที่สุด มีโครงสร้างพื้นฐานอย่างง่ายที่สุด มีการกล่าวถึงบ่อยที่สุด และมีปริมาณการใช้งานสูงที่สุดในบรรดาเทอร์โมพลาสติกทั้งหมด การผลิตพอลิเอทิลีน ทำได้โดยใช้เทคนิคการโพลีเมอร์ไรซ์หลายเทคนิค ได้ผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นไข จนถึงน้ำหนักโมเลกุลสูง และระดับการเป็นผลึกสูง โพลีเอทิลีนมีหลายชนิดดังนี้

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

เป็นโพลีเอทิลีน ที่มีการผลิตเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรก ในปี ค. 1939 .ศ. โดยบริษัท ไอซีไอ ประเทศอังกฤษ มีการเป็นผลึกต่ำ ผลิตโดยใช้เทคนิคโพลีเมอร์ไรซ์แบบอนุมูลอิสระ (Free-radical bulk polymerization) (โดยใช้ออกซิเจนหรือเพอร์ออกไซด์เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้สภาวะที่มีความดันอุณหภูมิสูง กล่าวคือ ความดันในช่วง 300-250 บรรยากาศและ อุณหภูมิ 3000-1000° C การเตรียม LDPE สามารถทำแบบต่อเนื่องในปฏิกรณ์ที่เป็นระบบท่อ (Tubular reactor) หรือ เติร์ย (แบบแบทช์ ในปฏิกรณ์ที่เป็นถัง) Batch reactor)

LDPE เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานสูงที่สุดทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา, ยุโรป และในประเทศไทย ภายใต้สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิและความดันสูงจะทำให้ เกิดสาขาโซ่ (Side chains branching) (จำนวนมาก บนโมเลกุล LDPE ซึ่งสาขาโซ่เป็นแบบสาขาโซ่สั้น) Short-chain branching, SCB และ (สาขาโซ่ยาว) Long-chain branching, LCB (ซึ่งโมเลกุลประกอบด้วยสาขาโซ่สั้น ที่มีอะตอมคาร์บอน อะตอม 2

)C2 หรือ Ethyl side group และ ส (สาขาโซ่สั้น ที่มีอะตอมคาร์บอน 4 อะตอม)C4 หรือ Butyl side group (อะตอม ซึ่งในจำนวนอะตอมบนคาร์บอน 1000 หมู่ ต่อ จำนวนอะตอมคาร์บอนบนสายโซ่หลัก 15 ประมาณ) ที่เท่ากันนี้จะมี สาขาโซ่ยาว LCB สายโซ่ เท่านั้น ส่วนของโมเลกุล 4-3 ประมาณ (LDPE จะมีส่วนที่ไม่เป็น สาขาโซ่ ซึ่งสามารถที่จะเรียงตัวกันแน่น เกิดเป็นส่วนที่เป็นผลึก) Crystalline region แต่ผลของการมีหมู่ (สาขาโซ่จำนวนมาก ทำให้โมเลกุล LDPE ไม่สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้มากนัก ซึ่งส่งผลให้ LDPE มีสมบัติ ดังนี้

- มีองศาของการเกิดผลึก)Degree of crystallinity 70- 50 คำ กล่าวคือ ประมาณ (%)
- มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ $115 - 110^{\circ}\text{C}$
- มีความหนาแน่นต่ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร $0.93 - 0.91$ โดยทั่วไป)

ลักษณะเฉพาะของ LDPE คือ ชิ้นงานที่ผลิตได้ค่อนข้างนิ่ม และมัน)waxy feel ค่อนข้างทึบ (แสง ถ้าค่อยๆ เผลา จะไม่มีควัน ให้เปลวไฟสีเหลือง มีกลิ่นไขมัน มักจะหยดไฟขนาดเล็กตก)Drip fireballs (ทนต่อสารเคมีและน้ำดีเยี่ยมที่อุณหภูมิห้อง แต่ไม่ทนต่อสารเคมีภายใต้สภาวะที่มีความเค้นสูง โดยเฉพาะ LDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงกล่าวได้ว่า LDPE มีการทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากความเค้น (Environmental Stress Cracking Resistance, ESCR) ต่ำ มีสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะในสภาวะที่เป็นโฟม

การผลิต LDPE มีหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน จึงมีการผลิต LDPE ที่มีค่าดัชนีการไหล)MFI ในช่วงกว้างมาก ค่า (MFI ใช้วัดความสามารถในการไหลของโพลีเมอร์หลอม ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดการทดสอบในบทที่ โดยทั่วไป 3LDPE จะสามารถทำการแปรรูปได้ง่าย ทั้งโดยการฉีดเข้าเบ้า การเอ็กซ์ทรูด การเป่าฟิล์ม การเป่าเข้าเบ้า และการแปรรูปแบบเบ้าหมุนการมีลักษณะมัน จะทำให้มีปัญหาในการพิมพ์ หรือการระบายสีบนชิ้นงานที่ผลิต ดังนั้นจึงต้องทำการออกซิไดซ์ผิวของ LDPE ก่อน โดยการทำโคโรนาดีสชาร์จ)corona discharge หรือ ใช้เปลวไฟเผา (

การประยุกต์ใช้ LDPE ประมาณ ของ 4 ใน 3LDPE ที่ผลิตทั้งหมด ใช้ในการผลิตฟิล์มและแผ่นพลาสติก)film และ sheet ซึ่งใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตถุงหิ้ว และถุงชนิดอื่นๆ ส่วนที่ (เหลือจะใช้เป็นฉนวนหุ้มสายไฟ ใช้ในการเคลือบผิว และผลิตชิ้นงานจากการฉีดเข้าเบ้า การประยุกต์ใช้งาน LDPE สรุปดังตารางที่ 2.3

2. โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง)High Density Polyethylene ,HDPE(

ในปี ค 1953 .ศ.มีการค้นพบโพลีเอทิลีนชนิดใหม่ คือ HDPE ซึ่งใช้เวลาประมาณ ปี 20 หลังจากการค้นพบ LDPE โพลีเอทิลีนชนิดนี้ ผลิตโดยใช้อุณหภูมิและความดันต่ำกว่า LDPE มาก และเป็นโพลีเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงกว่า LDPE นอกจากนี้ HDPE มีความหนาแน่นสูงกว่ามีอุณหภูมิการอ่อนตัว)Softening temperature และ (ปริมาณการเป็นผลึกสูงกว่า LDPE

ตารางที่ 2.3 สรุปการประยุกต์ใช้งาน LDPE

การประยุกต์ใช้งาน	ปริมาณ)%(
ฟิล์มและแผ่นพลาสติก	73
ชิ้นงานจากการฉีดเข้าบ่้า	7
เคลือบสายไฟและเคเบิ้ล	4
ชิ้นงานจากในการเป่า	3
ท่อจากการเอ็กซ์ทรูด	3
การใช้งานในลักษณะอื่นๆ	10

ผู้ค้นพบวิธีการเตรียม HDPE คือ Carl Ziegler ศาสตราจารย์ชาวเยอรมัน เตรียมโดยใช้คะตาลีสต์ (catalyst) กลุ่ม คือ ทิทาเนียมเฮไลด์ 2 ซึ่งประกอบด้วยสารเคมี (Titanium halides และ (อลูมิเนียมไตรอัลคิล) Aluminium trialkyl) ตัวอย่าง คะตาลีสต์ เช่น ทิทาเนียมเตตราคลอไรด์ (TiCl_4) และ ไตรเอธิลลูมิเนียม ($\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) ใช้สภาวะในก (C_3) (รผลิต คือ อุณหภูมิ $70 - 60^\circ \text{C}$ ความดันบรรยากาศ $10 - 1$

ในระยะเวลาที่ใกล้เคียง ในปี ค 1956 .ศ.บริษัท Philips Petroleum ประเทศอเมริกา ค้นพบการใช้คะตาลีสต์ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งตรึงไว้บนอลูมินา (Al_2O_3) หรือวัสดุระหว่างซิลิกากับอลูมินา (สามารถผลิต HDPE ที่ความดันต่ำเช่นกัน กล่าวคือใช้ความดันประมาณ บรรยากาศ แต่อุณหภูมิที่ใช้ยัง $100 - 200$ องศาเซลเซียส คือสภาวะในกระบวนการผลิตนี้ จะใช้ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน ที่ไม่ละลาย คะตาลีสต์ ทำให้สะดวกในการแยกโพลิเมอร์จากกระบวนการผลิต เทคนิคนี้จึงเป็นเทคนิคการผลิตแบบสลลอรี่ (Slurry method) ซึ่งนิยมใช้กันมากที่สุดในการผลิต (HDPE ในปัจจุบัน

อีกวิธีหนึ่งในการผลิต HDPE คือ Standard Oil Company Process มีลักษณะคล้ายกับ Philips Process ใช้ระบบคะตาลีสต์ที่เป็น สารประกอบออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่ตรึงอยู่บนวัสดุรองรับ ผสมกับโปรโมเตอร์ เช่น ใช้โมลิบดีนัมออกไซด์เป็นคะตาลีสต์ โดยใช้ร่วมกับโปรโมเตอร์ เช่น โลหะโซเดียม หรือโลหะแคลเซียม หรือสารประกอบไฮโดรด์ของโลหะสองชนิดนี้ สภาวะการเตรียม HDPE ของ Standard Oil Company Process คืออุณหภูมิ $270 - 230^\circ \text{C}$ และความดันบรรยากาศ บรรยากาศ $80 - 40$ บรรยากาศของ HDPE มีสาขาโซ่น้อยมาก ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นโพลิเมอร์ชนิดโซ่ตรง ดังนั้น โมเลกุลจึงสามารถเรียงตัวกันได้สนิทกว่า LDPE มาก จึงทำให้ HDPE มีความหนาแน่นสูงกว่า LDPE กล่าวคือ จะมีความหนาแน่นอยู่ช่วง $0.97 - 0.94$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตาม LDPE และ HDPE มีสมบัติที่คล้ายคลึงกัน เช่น การมีผิวมันมีสมบัติเป็นฉนวนทนต่อสารเคมีดีมากทั้งคู่ ตารางที่ 2 4.เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสมบัติของ LDPE, HDPE และ PP

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติของ LDPE HDPE และ PP

สมบัติ	LDPE	HDPE	PP
ความหนาแน่น)g/cm ³ (	0.93 – 0.91	0.97 – 0.94	0.91 – 0.90
ปริมาณผลึก)%(	70 – 50	95 – 80	82
อุณหภูมิหลอมเหลว0)°C (	120 – 98	135 – 127	171 – 165
การทนต่อแรงดึง)MPa(	16 – 4.1	38 – 21	41 – 31
โมดูลัสดึง)GPa(	0.26 – 0.1	1.24 – 0.14	1.55 – 1.10
การยืดที่จุดขาด)%(	800 – 90	130 – 20	600 – 100
การทนต่อแรงกระแทก)J/m(	ไม่แตก	1068 – 27	35 – 21
)Notched Izod test(			
อุณหภูมิการอ่อนตัว0)°C (	49 - 38	88 - 60	250 – 225
ภายใต้แรงกด 455KPa			

การประยุกต์ใช้งาน HDPE มักจะใช้ในการผลิตชิ้นงานโดยเทคนิคการเป่าเข้าเป่า เช่น ขวดบรรจุเครื่องดื่ม ยา และสารเคมี ของเล่นเด็ก ถังน้ำมันรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมนำ HDPE ผลิตถุงพลาสติกที่ทนความร้อนสูงกว่าถุงที่ผลิตจาก LDPE แต่ถุงจาก HDPE มักจะไม่ใสเนื่องจากการมีผลึกสูง และมีผลึกใหญ่ขึ้นงานจากการฉีดเข้าเป่าเช่น เครื่องใช้ในบ้าน ถังน้ำ ภาชนะต่างๆก็นิยมผลิตจาก HDPE ปริมาณการใช้งาน HDPE ในการผลิตชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ สรุปในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปการประยุกต์ใช้งาน HDPE

การประยุกต์ใช้งาน	ปริมาณ)%(
ชิ้นงานจากการเป่า	43
ชิ้นงานจากการฉีดเข้าเป่า	31
ฟิล์มและแผ่นพลาสติก	9
ท่อจากการเอ็กซ์ทรูด	8
เคเบิลสายไฟและเคเบิล	1
การใช้งานในลักษณะอื่น ๆ	8

โดยทั่วไป HDPE มีความเหนียวมากกว่า LDPE ดังนั้นจึงมีการพัฒนา HDPE ชนิดใหม่เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความเหนียว การทนต่อการกระแทก และการทนต่อการสึกหรอสูง HDPE ชนิดใหม่นี้มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมาก กล่าวคืออยู่ในช่วง ล้าน เมื่อเปรียบเทียบกับ 6-3HDPE ชนิดซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 50,000 – 300, เท่านั้นเรียก 000HDPE ชนิดใหม่นี้ว่าโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก)Ultra

high molecular weight polyethylene, UHMWPE ซึ่งเป็น (โพลิเมอร์ที่ต้องอาศัยการแปรรูปด้วยเทคนิคพิเศษ เนื่องจากไม่สามารถใช้กระบวนการแปรรูปที่ใช้กันโดยทั่วไปได้ มักจะใช้โพลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพลาสติกกรองพื้น)Liner รถบรรทุก (รถปิกอัพ ผลิตส่วนประกอบของเครื่องยนต์ เช่น เฟือง และ เกียร์ เป็นต้น โพลิเอทิลีน ชนิดนี้มีการประยุกต์ใช้งานในทำนองเดียวกับพลาสติกวิศวกรรม

3. โพลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) หลังจาก การค้นพบ HDPE ประมาณ 20 ปี ได้มีการค้นพบวิธีการผลิตโพลิเอทิลีนชนิดใหม่ คือ LLDPE ซึ่งมีสาขาโซ่สั้น แต่มีความยาวแน่นอนทำให้ LLDPE เป็นโพลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลได้เป็นระเบียบกว่า LDPE (ซึ่งมี สาขาโซ่ที่มีความยาวและตำแหน่งบนสายโซ่หลักแบบสุ่ม (ความเป็นระเบียบของโครงสร้างของ สายโซ่ของ LLDPE ได้มาจากการใช้โคโมโนเมอร์ทำปฏิกิริยาร่วมกับเอทิลีน ตัวอย่างโคโมโนเมอร์ เช่น บิวทีน) Butene (โพรพิลีน) Propylene) เฮกซีน (Hexene) ออกทีน (Octene) และเดซีน (Decene) เป็นต้น (โคโมโนเมอร์เหล่านี้มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้นตามลำดับความยาวของสาขาโซ่ของ LLDPE ที่ผลิต จะขึ้นกับจำนวนอะตอมคาร์บอนในโมเลกุลโคโมโนเมอร์ที่ใช้ การเตรียม LLDPE ใช้คะตาลิสต์ คือ ทิตาเนียมเฮไลด์ เช่น $TiCl_4$ หรือ $TiCl_3$ ตรึงลงบนบนวัสดุชนิดต่างๆ เช่น อะลูมินา ดังนั้นการผลิต (LLDPE คล้ายกับการผลิต HDPE, LLDPE มีสมบัติคล้ายกับ LDPE มากกว่า HDPE กล่าวคือ มีลักษณะนิ่มและการ ประยุกต์ใช้งาน LLDPE ส่วนใหญ่จะใช้ทำแผ่นและฟิล์มพลาสติก ซึ่งอาจจะใช้เดี่ยวหรือผสมกับ LDPE เพื่อ เพิ่มความเหนียว สมบัติเด่นของฟิล์มพลาสติก LLDPE คือสามารถดึงได้มาก) Drawdown (ทำให้สามารถ ผลิตฟิล์มได้บางกว่าโดยไม่มีการฉีกขาด มีการทนต่อการเจาะทะลุสูง) Puncture resistance ทนต่อการฉีก (ขาด และมีระดับผลึกสูงกว่าฟิล์ม LDPE นอกจากนี้โพลิเอทิลีนทั้ง ชนิดที่กล่าวมาแล้ว ยังมี 3 โพลิเมอร์ใน กลุ่มโพลิเอทิลีนหนาแน่นปานกลาง) Medium density polyethylene และโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ () Very low density polyethylene ครอบคลุมค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 0.915 ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่า (

4. โพลิเอทิลีนที่มีการเชื่อมโยง) Crosslinked polyethylene, XLPE (

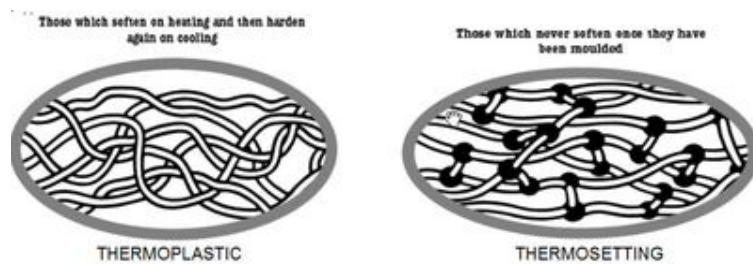
เตรียมโดยการใช้วิธีฉายรังสี หรือการใช้วิธีการทางเคมี การฉายรังสีจะทำให้พันธะ C-H และ C-C ในโครงสร้างของโพลิเอทิลีนเกิดการขาดเนื่องจากทนต่อรังสีพลังงานสูงไม่ไหว จึงเป็นอนุมูลอิสระที่ อยู่บริเวณใกล้เคียง เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ โมเลกุลของโพลิเอทิลีนจะเกิดการเชื่อมโยง แล้วเปลี่ยนจาก การเป็นเทอร์โมพลาสติกเป็นเทอร์โมเซต รังสีจะมีผลต่อโครงสร้างที่เป็นอัญฐานมากกว่าโครงสร้างที่เป็น ผลึก เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้รังสีกระจายเข้าไปยาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ LDPE เป็นวัตถุดิบใน การเตรียม XLPE โดยวิธีการนี้ อีกวิธีหนึ่งของการเตรียม XLPE คือการใช้วิธีการทางเคมี โดยใช้สารเปอร์ ออกไซด์ชนิดพิเศษเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยเปอร์ออกไซด์ชนิดนี้จะสามารถเกิดอนุมูล อิสระบนโมเลกุลได้หลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน ทำปฏิกิริยาได้โพลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงตัวอย่าง สาร เปอร์ออกไซด์ที่ใช้ เช่น Triallyl cyanurate เป็นต้น

สมบัติของ XLPE คือไม่เกิดการหลอมเมื่อได้รับความร้อน แต่จะสลายตัวแล้วกลายเป็นถ่าน แต่จะสามารถทำให้เกิดการอ่อนตัวได้ในระดับหนึ่ง ถ้าปริมาณโพลิเอทิลีนที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงใน

นอกจากมีการใช้งานโพลีเอทิลีน ที่เป็นไฮโพลีเมอร์แล้ว ยังมีการปรับปรุงสมบัติของโพลีเอทิลีนโดยการเตรียมโคโพลีเมอร์ชนิดต่างๆรายละเอียดการเตรียม สมบัติและการใช้งานของโคโพลีเมอร์เหล่านี้สามารถหาอ่านได้จากบรรณานุกรม และหนังสือด้านวัสดุโพลีเมอร์ทั่วไป

This collage displays a wide variety of plastic and rubber products. The top row includes a black rubber boot, a black circular disc, a red wheel, a black and white plastic component, a white plastic jug, and a black bicycle handlebar. The middle row features a black car interior, a blue and red plastic component, a black and white plastic component, and a black bicycle handlebar. The bottom row shows a black car interior, a blue and red plastic component, a black and white plastic component, and a black bicycle handlebar. The text 'Automotive Parts' is overlaid on the bottom left, and 'Wire and Cable' is overlaid on the bottom center. The bottom right corner contains the text 'กาบอัด' and 'www.kadad.com'.

โลกปัจจุบันเต็มไปด้วยวัสดุแบบลิบประเภทหลายพันชนิด ซึ่งความหลากหลายของวัสดุส่วนใหญ่เกิดจากการเล่นแร่แปรธาตุของมนุษย์ที่นำสิ่งนี้ผสมสิ่งนั้นกระทั่งเกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมา เช่น เมื่อผสมโลหะทองแดงกับโลหะสังกะสีได้โลหะทองเหลือง หรือผสมโลหะโครเมียมกับโลหะนิกเกิลได้โลหะชื่อนิโครม (Nichrome) เป็นต้น โพลีเมอร์ก็เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีหลากหลายชนิดทั้งที่ได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์ แต่ในบรรดาวัสดุโพลีเมอร์ทั้งหมดมีโพลีเมอร์ กลุ่มหนึ่งที่เกิดจากการนำเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มาผสมกับยาง หรือได้จากการเกิด โคโพลิเมอร์ (Copolymerization) ของส่วนที่อ่อน (Soft segment) กับส่วนที่แข็ง (Hard segment) กลายเป็นวัสดุถูกผสมเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer) หรือทีพีอี (TPE) ซึ่งวัสดุถูกผสมนี้กำลังมีบทบาทมากขึ้นในหลายอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบโครงสร้างเทอร์โมพลาสติกกับเทอร์โมเซตติง [7]

โดยนิยามแล้วเทอร์โมพลาสติกหมายถึง พลาสติกและโพลิเมอร์ประเภทที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาว สามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อนหลายครั้ง จึงสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ (หรือที่ภาษาชาวบ้านเรียกว่ารีไซเคิล) ได้หลายครั้ง พลาสติกประเภทนี้สามารถพบเห็นได้รอบตัวตั้งแต่ของธรรมดาอย่างถุงก๊อบแก๊บ ถุงพลาสติกใส-ขุ่น ขวดน้ำดื่มชนิดใส-ขุ่น กล่องโฟมใส่อาหาร ฯลฯ จนถึงสินค้าไฮเทคทั้งหลาย ไม่ว่าจะเป็นกล่องโครง(Case) ของคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะและโน้ตบุ๊ก แป้นพิมพ์ แผ่นซีดีและดีวีดี หน้ากากโทรศัพท์มือถือ พรีนเตอร์ เป็นต้น โดยจุดสังเกตสำคัญของพลาสติกประเภทนี้คือ สัญลักษณ์เลข 1 – 7 ที่บริษัทผู้ผลิตติดลงบนผลิตภัณฑ์ หรือได้ผลิตภัณฑ์เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการคัดแยกชนิด ส่วนอีลาสโตเมอร์หมายถึง โพลิเมอร์ที่มีสมบัติ ยืดหยุ่นได้ ได้แก่ ยางหลากหลายชนิดทั้งที่ได้จากธรรมชาติและ การสังเคราะห์ อีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่เป็นโพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermoset) มีโครงสร้างโมเลกุลลักษณะเป็นสายโซ่ที่เชื่อมโยงกันคล้ายตาข่าย ทำให้วัสดุประเภทยาง หรือโพลิเมอร์ประเภทนี้ไม่สามารถเกิดการหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ทำให้ยากที่จะนำกลับมารีไซเคิลใหม่ ขณะที่วัสดุผสมอย่างเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หมายถึง โพลิเมอร์ที่สามารถนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติก โดยมีสมบัติเหมือนยาง อ่อนนุ่มที่นำไปใช้งาน และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การจำแนกประเภทเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์กระทำได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ เช่น การแบ่งด้วยวิธีการเกิดโพลิเมอร์ (Polymerization) สัณฐานวิทยา (Morphology) เป็นต้น สำหรับบทความนี้ขออิงตามรายงานเรื่อง Thermoplastic Elastomers – Recent Developments and the European Market ของ Rapra Technology Ltd. ที่แบ่งวัสดุจากประเภทที่มีสมบัติปานกลาง มีราคาถูก ไปถึงเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆ ดีมาก และมีราคาแพง โดยแบ่งเป็น 6 ประเภท ดังนี้

1. สไตรีนิกบล็อกโคโพลิเมอร์ (Styrenic Block Copolymer, SBC) ประกอบด้วยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ 3 ชนิดคือ เอสบีเอส (styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS) เอสไอเอส (Styrene-isoprene-styrene block copolymer, SIS) เอสอีบีเอส (SEBS, Styrene-ethylene-butadiene-styrene block copolymer)

สไตรีนิกบล็อคโคโพลิเมอร์เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีราคาถูกกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์กลุ่มอื่น มีสมบัติทนทานต่อการเสียดสี และความล้า สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี วัสดุกลุ่มนี้ถูกประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น เอสบีเอสใช้เป็นส่วประกอบรองเท้า เอสไอเอสมีสมบัติเหนียวและอ่อนตัวจึงใช้เป็นสารยึดติด ส่วนเอสอีบีเอสมีความแข็ง และความทนทานมากกว่าเอสบีเอสและเอสไอเอส จึงใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และส่วนประกอบของสายเคเบิล

2. เทอร์โมพลาสติกโอเลฟิน (Thermoplastic Olefin, TPO) ได้จากการผสมเทอร์โมพลาสติกประเภทโพลิโอเลฟิน เช่น โพลิเอทิลีน โพลิโพรพิลีน กับอีลาสโตเมอร์ หรือยางชนิดต่างๆ ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ ฯลฯ โดยสมบัติเชิงกลหลายอย่างของวัสดุ เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็ง (Hardness) จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพลาสติกและยางที่นำมาผสมกัน

3. อีลาสโตเมอร์อีลาสตอยด์ (Elastomeric Alloys, EA) ได้จากการผสมเทอร์โมพลาสติก เช่น โพลิโพรพิลีน (Polypropylene) ไนลอน (Nylon) ฯลฯ กับยางที่ยังไม่ผ่านการบ่ม เช่น ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) ยางเอสบีอาร์ (SBR) เป็นต้น โดยระหว่างกระบวนการผสมจะทำการเติมสารเคมี เพื่อให้วัฏภาคของยางที่กระจายตัวอยู่ในพลาสติกเกิดการคงรูปหรือเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) ซึ่งหลังจากวัฏภาคของยาง ในอีลาสโตเมอร์อีลาสตอยด์ถูกบ่มแล้วจึงทำให้วัสดุชนิดนี้ มีสมบัติเชิงกลหลายอย่างกว่าวัสดุในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกโอเลฟิน การประยุกต์ใช้วัสดุพบในอุตสาหกรรมสายไฟ และเคเบิล ชิ้นส่วนยานยนต์ และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้กับเครื่องจักรกล

4. เทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (Thermoplastic Polyurethane, TPU) เป็นเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ที่มีราคาสูง แต่วัสดุมีจุดเด่นเรื่องความทนทานต่อการเสียดสี และการฉีกขาด (Tear) จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำพื้นรองเท้า หรือทดแทนชิ้นส่วนยางชนิดอื่นที่ไม่ทนทานต่อการเสียดสี นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น เช่น อุปกรณ์การแพทย์ ชิ้นส่วนยานยนต์ สายไฟและสายเคเบิล เป็นต้น

5. โคโพลิเอสเทอร์ (Copolyester, COPE) เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติเด่นทั้งในเรื่องความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ทนความร้อน และสารเคมีต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายเหมือนวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เนื่องจากวัสดุกลุ่มนี้มีสมบัติโดดเด่นหลาย ด้านทำให้โคโพลิเอสเทอร์ถูกจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เชิงวิศวกรรม (Engineering thermoplastic elastomer) และถูกประยุกต์ใช้งานหลายอย่าง เช่น เคลือบใยแก้วนำแสง ผลิตภัณฑ์กีฬา ชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ

6. โคโพลิเอไมด์หรือโพลิเอไมด์ (Copolyamide, Polyamide, COPA) เป็นเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์อีกกลุ่มที่มีความแข็งแรง และความยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อการฉีกขาด การขัดถู (Abrasion) และความล้า (Fatigue) จากการใช้งาน นอกจากนี้ยังทนทานต่อสารเคมีและน้ำมัน ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถนำวัสดุกลุ่มนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น พื้นรองเท้ากีฬาท่อ-ยาง หุ้มเส้นลวด หุ้มเคเบิล ฯลฯ

2.6.1 ข้อดีและข้อเสียของ TPE

จุดเด่น เมื่อเทียบกับยางคงรูป

1. สามารถนำวัสดุและเศษวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ เพราะเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หลอมเหลวได้หลายครั้งเหมือนพลาสติกทั่วไป
2. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูปจะใช้เวลาในการฉีดสั้นมาก จึงช่วยให้มีผลผลิตในการผลิต (Productivity) สูงขึ้นและช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีต้นทุนต่ำลง
3. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ผลิตมาเพื่อให้พร้อมที่จะใช้งาน จึงไม่ต้องผสมเคมีมาก หรือมีการผสมเคมีที่น้อย ง่ายเหมือนกรณียางคงรูปทั่วไป (ทำให้ไม่เกิดปัญหาความแปรปรวนจากการผสมเคมีแต่ละครั้ง) Batch to batch) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผสมและกระบวนการคงรูปด้วย
4. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีกระบวนการผลิตที่ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานคนที่มีทักษะสูงมาก
5. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถทำให้เป็นสีต่างๆ ตามความต้องการได้ง่าย
6. ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความถูกต้องทางด้านขนาด (Dimension) มากกว่า
7. กระบวนการผลิตไม่ทำให้เกิดก๊าซพิษ เช่น ไนโตรซามีน เป็นต้น

จุดด้อยของ TPE เมื่อเทียบกับยางคงรูป

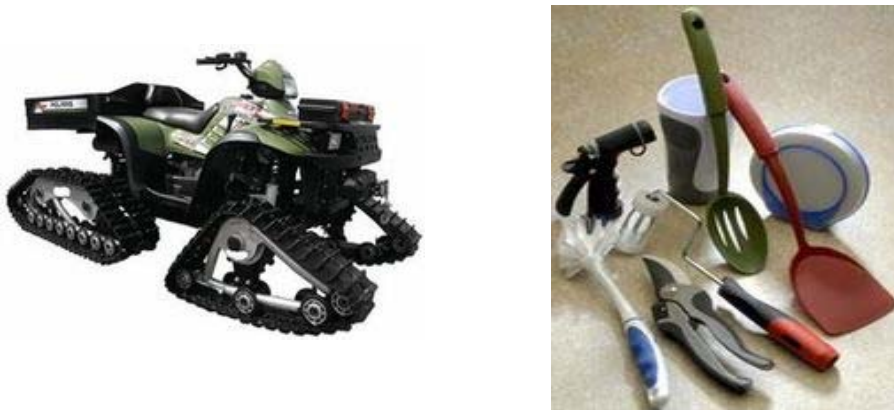
1. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีราคาสูง
2. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าการเสียรูปถาวรหลังกด (Compression set) สูงกว่า มี) (ความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางคงรูป
3. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถหลอมเหลวและไหลได้ในสภาวะอุณหภูมิสูงจึงไม่เหมาะกับการใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงมาก
4. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่มีความแข็งค่อนข้างสูง
5. ในบางกรณี อาจจำเป็นต้องนำเม็ดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไปอบไล่ความชื้นก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป



รูปที่ 2.20 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [7]

2.6.2 การขึ้นรูป

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการอัดรีด (Extrusion) การฉีดเข้าแบบ (Injection molding) การเป่าเข้าแบบ (Blow molding) การขึ้นรูปโดยอาศัยความร้อน (Thermoforming) การเชื่อมด้วยความร้อน (Heat welding) การอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding) โดยการขึ้นรูปบางวิธี เช่น การอัดรีดและการฉีดเข้าแบบสามารถใช้เครื่องจักรแบบเดียวกับที่ใช้ขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ [7]

2.6.3 การประยุกต์ใช้งานอิลาสติกเทอร์โมเซต

ปัจจุบันวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ถูกประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่ต้องการสมบัติเชิงกลสูง ซึ่งยางหรือวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นอื่นไม่สามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างที่ต้องการ เช่น การนำโคโพลิเอสเตอร์มาทำสายพานล้อยของรถวิ่งบนหิมะ (Snowmobile) เพราะวัสดุมีสมบัติเหนียว และทนทานต่อการเสียดสีได้ดีมาก หรือการนำเทอร์โมพลาสติกโพลิยูรีเทนมาทำหลอดสวน (Catheter – อุปกรณ์ที่ใช้สอดเข้าไปในร่างกายคนไข้เพื่อนำของเหลวออกมา) เพราะวัสดุให้สัมผัสที่นุ่มนวลไม่แข็งกระด้างต่อคนไข้ เป็นต้น หมายเหตุ ค่าการเสียรูปถาวรหลังกด (Compression set) เป็นค่าบอกปริมาณการเสียรูปร่างอย่างถาวรที่เกิดกับวัสดุ ซึ่งถูกบีบอัดให้เสียรูป (ความหนา) ไปภายใต้ระยะเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด โดยระบุค่าการสูญเสียรูปร่างวัสดุเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น

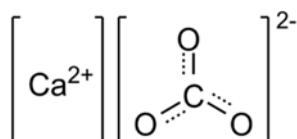
ค่าการเสียรูปถาวรหลังกด = 40% หมายความว่า หลังจากวัสดุเทอร์โมพลาสติก อิลาสโตเมอร์ถูกบีบ

อัตราเสื่อยรูปภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด วัสดุสามารถกลับคืนรูปได้เพียง 60%
ค่าการเสื่อยรูปถาวรหลังกด = 100% หมายความว่า วัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ถูกบีบ
อัตราเสื่อยรูปภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด ไม่สามารถกลับคืนรูป (ความหนา) เดิมได้แม้แต่น้อย

2.7 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano - CaCO₃)

2.7.1 สมบัติทั่วไป

นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีชื่อมาตรฐานคือ Ultra-fine calcium carbonate เป็นวัตถุดิบชั้น
กลางที่ผลิตจากหินปูน มีคุณสมบัติไม่เป็นพิษ มีความขาวและความสว่างสูง จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้
หลากหลาย เช่น การใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) และตัวเพิ่มปริมาณ (Extender) ในอุตสาหกรรม
กระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี และอุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน
ผงซักฟอก ยา และเวชภัณฑ์ต่างๆ นอกจากนี้ ยังใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์
โทรศัพท์ สายหุ้มโทรศัพท์ ฉนวนหุ้มสายไฟ ยางลบ ถูมือ และแว่นตา เป็นต้น



รูปที่ 2.22 สูตรโครงสร้างทางเคมีของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

2.7.2 กรรมวิธีการผลิต

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ (Ground Calcium Carbonate:, GCC) ได้จาก
การบดแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone), หินอ่อน (Marble), ชอล์ก (Chalk) และแร่
แคลไซต์ (Calcite) กรรมวิธีการผลิตมีหลายขั้นตอน อาทิ การลดขนาดแร่ (Size Reduction) และ
การคัดขนาด (Classification) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ ตามที่ตลาดต้องการ แคลเซียม
คาร์บอเนตชนิดตกผลึก (Precipitated Calcium Carbonate, PCC) ได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนต
ธรรมชาติมาตกผลึกใหม่เป็นผงขนาดเล็ก ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสและไม่ละลายน้ำ

2.7.3 ผลิตภัณฑ์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

แบบผง (Dry Powder) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติโดยตรง มี
ลักษณะเป็นผงสีขาวอนุภาคขนาด 1-147 ไมครอน ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี พลาสติก ยางผงซักฟอก
ยาสีฟันแบบเคลือบผิว (Surface Coated Product) ได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติแบบผง
อนุภาคขนาด 1-15 ไมครอนมาเคลือบผิวอนุภาค เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี
และอุตสาหกรรมยางแบบไม่เคลือบผิว (Uncoated Product) เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมอยู่ใน

รูปของของแข็ง ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ กับเม็ดพลาสติก ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกขึ้นรูปต่างๆ เช่น ถูบปุย กระสอบพลาสติก ฉนวนสายไฟ ภาชนะ และท่อต่างๆแบบน้ำ (Slurry Product) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ เนื่องจากตอบสนองความต้องการของโรงงานผลิตกระดาษด้านความสะดวกในการใช้งาน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แบบแห้งต้องมีขั้นตอนการทำให้เป็นแบบน้ำอีกครั้งที่โรงงาน ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตกระดาษ

2.7.4 การใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในยางหรือโพลีเมอร์

นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เติบโตมากที่สุดในอุตสาหกรรมพลาสติก ส่วนใหญ่อยู่ในผลิตภัณฑ์พลาสติกคุณภาพสูง สามารถปรับปรุงวิทยากระแสดและเพิ่ม Formability ของพลาสติก พลาสติกจะมีความแข็งแรงเมื่อใส่ตัวเติม และจะแข็งแรงมากขึ้นเมื่อพลาสติกโค้งงอ เมื่อได้รับความร้อนก็จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ขณะเดียวกันการคืนสภาพของชิ้นงานก็ไม่สมบูรณ์เมื่อโดนความร้อน นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ยังมีสมบัติในการดูดซับน้ำหมึกได้ดี , โปร่งแสง , และมีความเงา ซึ่งในน้ำหมึก Resin-based จะเติม นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีความเสถียรภาพดี มีความเงาสูง ไม่มีผลต่อคุณสมบัติในการแห้งของหมึกพิมพ์ อีกทั้งยังช่วยปรับตัวให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นการเติม นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการความละเอียดอ่อน ความขาวและสมบัติการมองเห็นได้ดี แคลเซียมคาร์บอเนตในระดับนาโนจะมีความละเอียดมาก ซึ่งส่งผลให้สีมีความหนาแน่นมากขึ้น เกิดการลอยตัวของอนุภาคของเหลว ยังช่วยในการป้องกันการเสื่อมของสี เพิ่มความขาว, มีความเงาสูง อีกทั้งยังช่วยในการปกป้องพื้นผิว ส่วนใหญ่นำไปเคลือบสีรถยนต์ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมยาง หนึ่งในอุตสาหกรรมหลัก การเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนต , อัตราการวัลคาไนซ์ ยางระยะเวลานานๆ เกิดการฉีกขาด เสียรูป และการทนต่อการบิดงอ โดยทั่วไปจะเพิ่ม แคลเซียมคาร์บอเนต มากกว่า เรซิน หลังจากการรักษากรดของ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ในอุตสาหกรรมอาหารสามารถใช้เป็นอาหารเสริม แคลเซียม เพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมของอาหาร อีกทั้งยังใช้ทำเครื่องสำอางเนื่องจากความบริสุทธิ์สูง มันขาวมีอนุภาคละเอียดสามารถใช้แทนที่ไททาเนียมไดออกไซด์ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ในอุตสาหกรรมอาหารสามารถนำ แคลเซียม เพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมในอาหารได้



รูปที่ 2.23 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ Nano-calcium carbonate [5]

2.7.5 ข้อดีของแคลเซียมคาร์บอเนตกับพลาสติก

แคลเซียมคาร์บอเนต ช่วยเพิ่มเนื้อพลาสติกให้กับฟิล์มหรือชิ้นงานของท่านได้ ใช้ได้ทั้งในงาน Film, Blow และ Injection

- 1) เพิ่มผลผลิต)Output increase)
- 2) ลูกโป่งเสถียร)Bubble Stability)
- 3) พิมพ์ดีดี)Improved Printability)

ผิวฟิล์มขรุขระขึ้น)Micro Roughness) ส่งผลให้แรงตึงผิวฟิล์ม (SurfaceTension) สูงขึ้น การยึดเกาะของหมึกพิมพ์ดีขึ้นความเร็วในการพิมพ์เร็วขึ้น

- 4) พัฒนาเรื่องการซีล) Improved Heat Seal)

แคลเซียมมีคุณสมบัติการนำความร้อนมากกว่าพลาสติกประมาณ 5 เท่า จึงสามารถลดการตั้งความร้อนในการซีลลง หรือลดเวลาในการซีลลงได้ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทำโกรงงานนี้

2.7.6 หน้าที่ของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

ผลิตภัณฑ์นี้ผลิตโดยกรรมวิธีการใช้ แรงโน้มถ่วงพิเศษ (Super-gravity) ขนาดอนุภาคที่จำหน่ายมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40-80 นาโนเมตร และประเภทที่ต้องการความขาวสูง ซึ่งในการนำไปผสมกันของวัสดุนาโนจะกระจายตัวได้ดีมากและสามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ในขณะเดียวกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลจะพบว่าช่วยกระบวนการผลิตให้ง่ายขึ้นโดยเพิ่มคุณสมบัติช่วยในการไหลดีขึ้น นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด P100 สำหรับ Model :WGD-P100-RB จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทนทาน เช่น การปรับปรุงความทนต่อการกดอัดของ CPE ,MBS ,ABS, ACR และอื่น ๆ ใน PVC และ U-pvc สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณลักษณะที่เป็นวัสดุนาโนและเทคนิคในการปรับปรุงพื้นผิว อีกทั้งยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติแรงที่กระทำตรงรอยบาก และ เพิ่มคุณสมบัติของความทนต่อการบิดงอ

นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด P200 สำหรับ Model :WGD-P200-ZD จะมีสมบัติต่างๆ คล้ายกับ Model :WGD-P100-RB แต่จะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าที่ 60-100 นาโนเมตร และมีความแตกต่างในสมบัติอื่นๆ ดังตารางการเปรียบเทียบด้านล่าง

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติต่างๆ ของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด P100 และ เกรด P200

Model Specification	WGD-P100-RB	WGD-P200-ZD
Appearance	White powder	White powder
Specific gravity g/ml	2.20-2.50	2.20-2.50
Moister %	≤ 0.5	≤ 0.5
Main proportion	≥ 92	≥ 93
BET m ² /g	≥ 17	≥ 14
Whiteness %	≥ 90	≥ 91

ตารางที่ 2.7 แสดงสมบัติต่างๆของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เกรด P100 และ เกรด P200 (ต่อ)

Item	CaCO ₃ Content (%) $\geq$	Particle Size(nm)	Moisture (%) $\leq$	PH Value	Insoluble in HCL (%) $\leq$	Whiteness $\leq$	Activation Grade (%) $\geq$	Oil Absorpti- on Value mL/100g
P100	92	40-80	0.5	7.5-9.5	0.1	90	92	40
P200	93	60-100	0.5	7.5-10	0.1	91	95	40

ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต

Properties	Specification	Result
Assay (dried basis)	99% minimum	*99.02%
Insol in dil HCL	0.01% maximum	<0.01%
Cl	0.005% maximum	<0.005%
SO ₄	0.03% maximum	<0.03%
Ba	0.01% maximum	<0.01%
Fe	0.003% maximum	<0.003%
Mg	0.02% maximum	<0.02%
K	0.01% maximum	<0.01%
Na	0.2% maximum	<0.2%
Sr	0.1% maximum	<0.1%

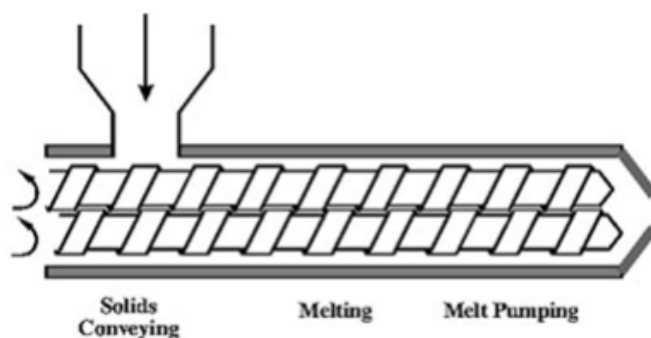
2.8) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruders)

นิยมใช้งานอัดรีดที่มีผลิตภัณฑ์เป็นท่อ และ Profile extrusion โดยเฉพาะ PVC ชนิดแข็ง นอกจากนี้แล้วยังใช้ในงานผสมเม็ดพลาสติก (Compounding) ที่มีปริมาณมาก เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่แบ่งตามทิศทางการหมุนของ สกรู 2 แบบ คือ

- (1) เครื่องอัดรีดสกรูคู่หมุนไปทางเดียวกัน (Co – rotating twin screw extruder)
- (2) เครื่องอัดรีดสกรูคู่ หมุนสวนทางกัน (Counter – rotating twin screw extruder) โดยส่วนใหญ่แล้วสกรูทั้งสองแบบนี้ จะเป็นแบบ Non - Intermeshing และมีทิศทางการหมุนสวนทางกันจะใช้ในการผสม (Blending) จะช่วยลดความดันไอ (Devolatilising) และการทำปฏิกิริยากันของโพลีเมอร์

2.8.1 ข้อจำกัดของเครื่องอัดรีดสกรูคู่

ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูจะต้องอยู่ในช่วง 10-40 รอบนาที ข้อจำกัดนี้มีความสำคัญมาก / เพราะมีผลต่อขนาดของ Thrust bearing สกรูของระบบนี้จะมีขนาดซับซ้อนมากกว่า และส่วนใหญ่จะเป็นในลักษณะ Intermeshing ซึ่งต้องการความละเอียดมากในการประกอบสร้าง ดังนั้นจึงมีราคาแพงกว่า จะใช้กับงานในกรณีเฉพาะเท่านั้นและจะมีค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูง เครื่องอัดรีดชนิดสกรูส่วนใหญ่ จะมีการป้อนแบบผลึก Starve – fed เพื่อให้มั่นใจว่า Thrust bearing จะไม่เกิดสภาพการทำงานที่เกินภาระ (Overload) และเมื่อมีการผสมจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการควบคุมหลักของเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ จึงเป็นการควบคุมปริมาณของเม็ดพลาสติกที่ป้อนเข้ามาในเครื่องอัดรีด

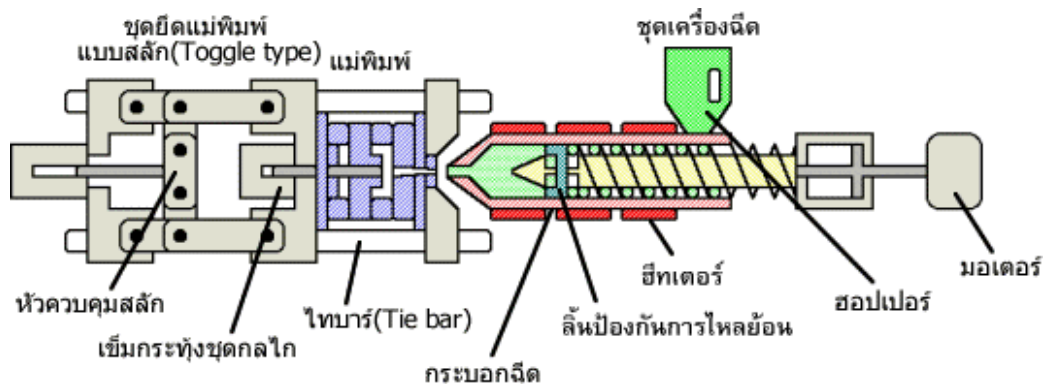


รูปที่ 2.25 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) [9]

เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่แบบที่เป็น Intermeshing นั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับปั๊มในการเคลื่อนย้ายของไหล ดังนั้นไม่จำเป็นต้องอาศัยการไหลแบบลากพาในการเคลื่อนย้ายเม็ดพลาสติกหลอม ซึ่งผลที่ตามมาคือ ลดปัญหาที่เกี่ยวกับความร้อนที่เกิดจากการขัดสี ซึ่งเป็นข้อพิจารณาที่มีความสำคัญมากต่อการให้ความร้อน กับเครื่องอัดรีด และต่อเม็ดพลาสติกที่ไวต่อแรงเฉือน เช่น PVC

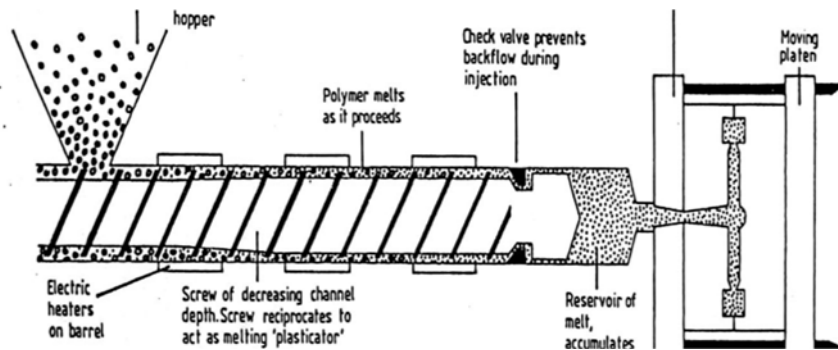
2.9 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding)

เครื่องฉีดขึ้นรูปสามารถแบ่งออก เป็น 2 ส่วน คือส่วนประกอบแม่พิมพ์และส่วนการฉีดส่วนประกอบแม่พิมพ์จะทำหน้าที่ใน การเปิดปิดแม่พิมพ์และกระทุ้งชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ส่วนประกอบแม่พิมพ์มี 2 ประเภท คือประเภทแบบสลัก (Toggle type) ตามที่ได้แสดงไว้ดังรูปด้านล่างและ แบบไฮดรอลิกตรง (Straight-Hydraulic type) ซึ่งแม่พิมพ์จะถูกเปิดและปิดโดยตรงกับกระบอก ไฮดรอลิกหน่วยการฉีดจะทำหน้าที่ในการ หลอมละลายพลาสติกด้วยความร้อนแล้วจึงฉีดพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์สกรูจะถูกหมุนเพื่อหลอมละลายพลาสติกให้เหลวหลังจากนั้นพลาสติกเหลวจะเคลื่อนที่จากชอปเปอร์ไปสะสมยังด้านหน้าของสกรู(เรียกว่า Metering) จนกระทั่งได้พลาสติกเหลวจำนวนหนึ่งแล้ว กระบวนการฉีดจึงเริ่มขึ้นขณะที่พลาสติกเหลวไหลเข้าไปในแม่พิมพ์เครื่องฉีดจะควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของสกรูหรือความเร็วในการฉีด ในขณะเดียวกันเครื่องฉีดก็ยังควบคุมความดันในการย่ำหลังจากที่พลาสติกเหลวไหลเข้าไปในเบ้าแล้ว ตำแหน่งของการเปลี่ยนจากการควบคุมความเร็วเป็นการควบคุมความดันจะถูกตั้ง ด้วยตำแหน่งของสกรูหรือความดันฉีดที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.26 ชื่อชิ้นส่วนของเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding) [9]

2.9.1 ส่วนประกอบเครื่อง Injection Molding



รูปที่ 2.27 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding) [9]

(1) ส่วนชุดฉีด (Injection Unit) จะทำหน้าที่ดึงพลาสติกเข้าสู่กระบอกฉีดหลอมเหลว แล้วส่งพลาสติกเหลวไปที่หัวฉีด และทำหน้าที่ในการฉีด และรักษาความดันย้ำ ซึ่งจะมีส่วนประกอบพื้นฐานดังต่อไปนี้ คือ

- หัวฉีด (Nozzle) เป็นส่วนต่อปลายกระบอกฉีดพลาสติกเข้ากับช่องทางไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ หัวฉีดมีขนาดเล็กเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว
- สกรู (Screw) มีลักษณะเป็นเกลียวขยาบหมุนป้อนส่วนผสมของพลาสติกให้เคลื่อนที่เข้าสู่กระบอกฉีด สามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับ เพื่อเพิ่มแรงดันให้พลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์
- กระบอกฉีด (Barrel) เป็นส่วนสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติกทำหน้าที่หลอมเหลวพลาสติกและสร้างแรงดันเพื่อฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์
- แผ่นความร้อน (Heater)
- กรวยเติมพลาสติก (Hopper) อุปกรณ์ส่วนนี้มีลักษณะเป็นกรวยขนาดใหญ่ เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพลาสติกและสารเติมแต่ง เพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก
- กระบอกสูบ และลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder and pistol)
- มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (Drive motor) อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกสำหรับหมุนสกรูและขับเคลื่อนสกรู เพื่อฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์

(2) ส่วนชุดปิด – เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) ทำหน้าที่ในการยึดแม่พิมพ์ทั้งสองส่วน เคลื่อนปิด – เปิดแม่พิมพ์ ให้แรงในการปิดแม่พิมพ์ หล่อเย็นชิ้นงานฉีดพลาสติก และปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ประกอบไปด้วยแผ่นยึดแม่พิมพ์ ซึ่งมีหน้าที่เคลื่อนที่ และอยู่กับที่ เพลาขับเคลื่อน ระบบขับเคลื่อนปิด – เปิดแม่พิมพ์ และแผ่นยึดระบบขับเคลื่อน

(3) ส่วนฐานของเครื่องฉีด (Base) ทำหน้าที่คอยรับน้ำหนักของชุดฉีด และชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ยึดติดอุปกรณ์ไฮดรอลิกทั้งหมดในเครื่อง และยังทำหน้าที่เป็นถังน้ำมันไฮดรอลิก โดย

ส่วนใหญ่แล้วตัวฐานเครื่อง จะทำด้วยเหล็กเหนียว ที่เชื่อมประกอบเข้าเป็นฐานเครื่อง เพื่อความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักมากๆ ได้ดี

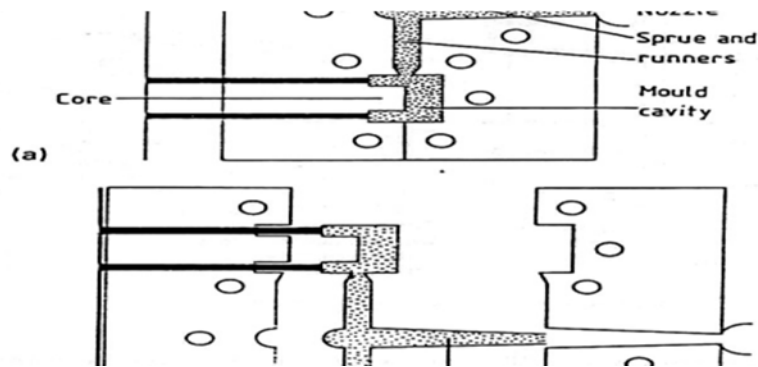
2.9.2 ขั้นตอนการฉีดพลาสติก

การฉีดพลาสติกแบบ Injection Molding นี้เครื่องฉีดจะประกอบด้วยสกรู และเคลื่อนที่ไปตาม แนวแกน เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กไปจนถึงชิ้นงานขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานได้ หลากลักษณะงาน จึงทำให้มีความนิยมในการฉีดพลาสติกแบบนี้มาก ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนของการฉีด พลาสติก

- (1) แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าปิด และล็อกแน่นเพื่อป้องกันการแยกด้วยแรงดันภายในแม่พิมพ์
- (2) ชุดฉีดเคลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์จนกระทั่งชนกับแม่พิมพ์ และค้างไว้ด้วยแรงที่พอเหมาะเพื่อ ป้องกันชุดฉีดถอยหลังกลับ ในขณะที่ทำการฉีด
- (3) ฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยสกรูจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน
- (4) ย้ำรักษาความดันให้กับพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานเนื้อแน่น และไม่เกิด รอยยุบตัวที่ผิวของชิ้นงาน
- (5) หล่อเย็นชิ้นงานฉีดในแม่พิมพ์โดยที่จังหวะนี้จะมีอิทธิพลมากต่อเวลาการทำงานทั้งวงจร
- (6) การหลอมและป้อนพลาสติกไปหน้าปลายสกรู เมื่อได้ปริมาณพลาสติกเหลวตามที่ต้องการ แล้วเกลียวหนอนจะหยุดหมุน
- (7) ชุดฉีดจะถอยหลังกลับเพื่อป้องกันอุณหภูมิของหัวฉีดลดต่ำลงเกินไป เพราะจะทำให้ พลาสติกหนืดเกินไปและไหลไม่ได้
- (8) แม่พิมพ์จะเปิดออกหลังจากสิ้นสุดเวลาในการหล่อเย็น
- (9) ทำการปลดชิ้นงาน เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกสุดแล้ว

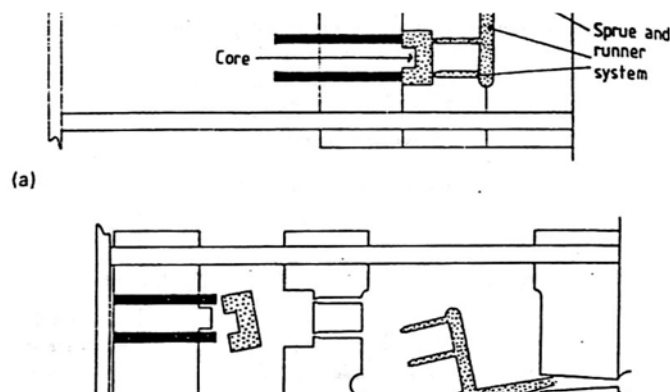
2.9.3 แม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์(Mold) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต แม่พิมพ์โดยทั่วไปมักออกแบบให้มี 2 ชั้น (Two-plate mold) เพื่อให้สะดวกต่อการถอดผลิตภัณฑ์ออกจาก แม่พิมพ์ นอกจากนี้ต้องมีช่องทางไหลของพลาสติกหลอมเหลวต่อจากหัวฉีดเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ เรียกว่า สปรู (Sprue) ในแม่พิมพ์ที่มีหลายช่อง (เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ครั้งละหลายชิ้น) จะต้องมีช่องทางแยก จากสปรูเข้าสู่แม่พิมพ์ แต่ละช่องเรียกว่า รันเนอร์ (Runner)



รูปที่ 2.28 Two-plate mold, closed and opened [9]

แม่พิมพ์ยังออกแบบให้มี 3 ชั้น (Three-plate mold) ซึ่งมี plate ชั้นที่ 3 อยู่ระหว่าง 2 Clamp plates ดังแสดงในรูปที่ 4 Three-plate molds จะใช้เมื่อระบบ Runner และช่องว่างของแม่พิมพ์อยู่ในระนาบที่แตกต่างกัน ซึ่งต้องการเปิด plate 2 ชั้น เพื่อนำชิ้นงาน Sprue และ Runners ออกจากแม่พิมพ์ มีการดึงให้ Sprue ออกจากช่องที่อยู่โดยใช้ Sprue-puller



รูปที่ 2.29 Three-plate mold, closed and opened. [9]

2.9.4 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก

คุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติกนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวด้วยกัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่แตกต่างกันออกไป มีรายละเอียดดังนี้

(1) อิทธิพลของชนิดพลาสติก ในงานฉีดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกนั้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก กับพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก พบว่าเมื่อพลาสติกได้รับความร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น คือ ในพลาสติกพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก เมื่อพิจารณาค่าปริมาตรจำเพาะ และค่าพลังงานจำเพาะ ที่ผลึกเริ่มหลอมเหลว (Glass Transition

Temperature) ค่าปริมาตรจำเพาะ และค่าพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้ว ค่าการนำความร้อนของพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเข้าใกล้จุดหลอมเหลวของผลึก แต่เมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวของผลึกแล้ว ค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นทันที ส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดผลึกหลอมเหลว และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อสิ้นสุดช่วงผลึกหลอมเหลวค่านี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว หมายความว่า พาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกต้องการความร้อนส่วนหนึ่ง เพื่อช่วยในการหลอมเหลวผลึกนั่นเอง

(2) อิทธิพลของการออกแบบ เนื่องจากการออกแบบชิ้นงานจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติโดยรวมของชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติการแปรรูป ค่าการไหลของพลาสติก (Flowability) รวมไปถึงข้อจำกัดในการออกแบบแม่พิมพ์ และการฉีด ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นการออกแบบแม่พิมพ์ การออกแบบระบบทางเข้า (Gate) ระบบทางไหลของพลาสติก (Runner) หรือแม้แต่กระทั่งระบบหล่อเย็น (Cooling) ล้วนแล้วแต่มีความสำคัญกับคุณภาพของชิ้นงานทั้งสิ้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบได้แก่ การหดตัว (Shrinkage) ความหนาของชิ้นงาน (Thickness) ความเรียวของชิ้นงาน (Taper) รัศมีระหว่างผิวต่อ (Fillet) ครีบก (Rib) ส่วนนูนของชิ้นงาน (Boss) ส่วนที่เป็นคอคอดของชิ้นงาน (Undercut) รอยต่อ (Weld Line) ระบบทางไหลของพลาสติก (Runner) ระบบทางเข้าพลาสติก (Gate) ความแข็งแรงของชิ้นงาน (Strength) และช่องระบายอากาศในชิ้นงาน (Air ventilation) เป็นต้น

(3) อิทธิพลของพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก มีบทบาทเป็นอย่างมากต่อคุณภาพชิ้นงานหากแม่พิมพ์ถูกออกแบบได้ถูกต้อง และเหมาะสมแล้ว ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานก็มีเพียงการปรับตั้งพารามิเตอร์เท่านั้น ซึ่งพารามิเตอร์ก็มีหลายค่าด้วยกัน แต่ค่าที่สำคัญได้แก่ ความเร็วในการฉีด ระยะเปลี่ยนความดันฉีดเป็นฉีดช้า เวลาในการรักษาความดันฉีดช้า เวลาในการหล่อเย็น เวลาในการหลอมเหลว และป้อนพลาสติกเหลว อุณหภูมิพลาสติกเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความดันไฮดรอลิก เป็นต้น การปรับตั้งค่าเหล่านี้ส่วนใหญ่เกิดจากการทดลองฉีดไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามต้องการ ซึ่งทำให้มีการสูญเสียเวลาและต้นทุนในการฉีดเป็นอย่างมาก หากผู้ปรับตั้งมีความรู้และความเข้าใจมากขึ้น ก็จะช่วยให้ฉีดได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและยังประหยัดเวลาและต้นทุนในการทดลองอีกด้วย

2.9.5 การขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine)

เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันสูง เครื่องจักรที่ใช้ในการนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่และเป็นที่นิยมแพร่หลายมีส่วนประกอบสำคัญคือ

(1) ฮอปเปอร์ (Hopper) อุปกรณ์ ส่วนนี้มีลักษณะเป็นกรวยขนาดใหญ่ เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพลาสติกและสารเติมแต่ง เพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก

(2) กระบอกฉีดและสกรู (Injector and screw) เป็นส่วนสำคัญของเครื่อง ฉีดพลาสติกทำหน้าที่หลอมเหลวพลาสติก และสร้างแรงดันเพื่อฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ประกอบด้วยกระบอกทรงติดอยู่กับที่ ส่วนต้นของกระบอกเป็นที่ติดตั้งฮอปเปอร์ ตรงส่วนกลางและส่วนปลายของกระบอกมีเครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุม อุณหภูมิให้คงที่ได้ ปลายของกระบอกจะต่อเข้ากับหัวฉีดภายในของ

กระบอกลูกปืนเป็นสกรูที่มีความยาวสั้น กว่ากระบอกลูกปืนเล็ก มีลักษณะเป็นเกลียวหยาบหมุนป้อนส่วนผสมของพลาสติกให้เคลื่อนที่เข้าสู่กระบอกลูกปืน สามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับ เพื่อเพิ่มแรงดันให้พลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์

(3) หัวฉีด (Nozzle) เป็นส่วนต่อปลายกระบอกลูกปืนพลาสติกเข้ากับช่องทางไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ หัวฉีดมีรูขนาดเล็กเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว

(4) มอเตอร์ขับเคลื่อน (Driven motor) มอเตอร์ขับเคลื่อน อาจเป็นมอเตอร์ ไฟฟ้า หรือมอเตอร์ไฮดรอลิก สำหรับหมุนสกรูและขับเคลื่อนสกรู เพื่อฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์

(5) แม่พิมพ์ (Mold) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต แม่พิมพ์ โดยทั่วไปมักออกแบบให้มี 2 ชิ้น เพื่อให้สะดวกต่อการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้ ต้องมีช่องทางไหลของพลาสติกหลอมเหลวต่อจากหัวฉีดเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ เรียกว่า สปรู (Sprue) ในแม่พิมพ์ที่มีหลายช่อง (เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ครั้งละหลายชิ้น) จะต้องมีช่องทางแยกจากสปรูเข้าสู่แม่พิมพ์แต่ละช่อง เรียกว่า รันเนอร์ (Runner)

(6) ตัวหนีบแม่พิมพ์ (Hydraulic clamp unit) มักเรียกกันว่า แคลมป์ เป็นกลไกสำหรับเปิดและปิดฝาแม่พิมพ์ขับเคลื่อนด้วยกำลังไฮดรอลิก อุปกรณ์ส่วนนี้ยังรวมทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่ออุ่นแม่พิมพ์ก่อนฉีด และอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวก่อนถอดออกจากแม่พิมพ์

(7) ชุดควบคุมกลาง (Central control) เป็นชุดควบคุมเครื่องจักรรวมทุก ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์วัด และควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุมความดัน และอุปกรณ์ตั้งเวลา

2.10 การทดสอบสมบัติทางกล

2.10.1 การทดสอบวัดความแข็ง (Hardness testing)

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับสมบัติแรงดึงในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งจะแตกต่างจากความแข็งเกร็ง (Stiffness) เพราะความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวเท่านั้น แต่ความแข็งเกร็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางก้อน หลักการพื้นฐานของการทดสอบของหัวกด (Indenter) ไปกดลงบนชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนด ความลึกของการทดสอบของหัวกด (Depth of penetration) จะสะท้อนถึงค่าความแข็งของยางที่มีความแข็งสูงก็จะมีค่าความลึกของการทดสอบของหัวกดต่ำ

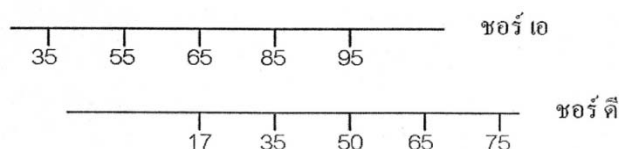


รูปที่ 2.30 แสดงภาพเครื่อง Durometer [9]

เครื่องวัดความแข็งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มี 2 แบบ คือ เครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) ซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบชอร์ เอ (Shore A) และชอร์ ดี (Shore D) และเครื่องวัดความแข็งในหน่วยของ IRHD (International Rubber Hardness Degree) เนื่องจากเครื่องคูโรมิเตอร์ ส่วนใหญ่ใช้แรงกดจากสปริงจึงมีความแม่นยำต่ำกว่าเครื่องวัดความแข็งในหน่วย IRHD ซึ่งใช้น้ำหนักที่คงที่เป็นตัวกดอย่างไรก็ตาม เครื่องคูโรเมอร์ก็ยังเป็นเครื่องนิยมนำมาใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเครื่องมีราคาค่อนข้างต่ำ

เครื่องคูโรมิเตอร์ Shore A นิยมใช้วัดความแข็งสำหรับยางทั่วไปที่มีความแข็งต่ำกว่า 90 Shore A แต่สำหรับยางที่มีความแข็งสูงกว่านี้ก็จะนิยมนำเครื่องวัดแบบ Shore D รูปที่ 2.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่าง Shore A และ Shore D อย่างไรก็ดีตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้เสมอว่าค่า 100 Shore A เทียบเท่ากับค่า 100 Shore D ดังนั้น สเกลจาก 95 - 100 ของ Shore D จึงเทียบเท่ากับสเกลจาก 50 – 100 Shore A

ปัจจุบัน การวัดค่าความแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานต่างๆ มากมายดังแสดงในตารางที่ 2.4 แม้ว่ามาตรฐาน ISO จะไม่ได้กำหนดวิธีวัดค่าความแข็งของยางด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์แต่มาตรฐาน ISO 868 ที่ออกแบบสำหรับทดสอบทดสอบพลาสติกและยางแข็งอีโบนิต (Ebonite) ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบสมบัติความแข็งของยางทั่วไปได้



รูปที่ 2.31 แสดงการเปรียบเทียบสเกลความแข็งของชอร์ เอ และ ชอร์ ดี [8]

ตารางที่ 2.9 วิธีการมาตรฐานในการทดสอบสมบัติความแข็ง [8]

มาตรฐาน ISO	การทดสอบ	มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
868	Plastic and ebonite-Determination of indentation hardness by means of a Durometer (Shore hardness)	ASTM D 2240, BS 2719, DIN 53505
48	Vulcanized rubber-Determination of hardness (hardness between 10 and 100 IRHD)	ASTM D 1415, BS 903 Part A26, DIN 53519
7619-1	Rubbers, vulcanized of thermoplastic-Determination of indentation hardness Part 1: Durometer method (Shore hardness)	ASTM D2240, BS 2719, DIN 53505

2.10.2 การทดสอบการทนต่อแรงดึง)Tensile strength ตามมาตรฐาน (ASTM D 638



รูปที่ 2.32 ลักษณะเครื่อง Tensile strength [9]

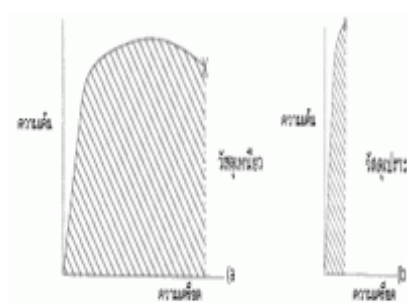
การต้านทานแรงดึงเป็นคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกที่บอกระดับความแข็งแรงของพลาสติกที่สามารถต้านทานต่อแรงดึง หรือมีความยืดหยุ่น โดยทำการทดสอบภายใต้น้ำหนัก เป็นการทดสอบระยะสั้น)Short term (Stress-strain โดยใช้มาตรฐานอ้างอิง ASTM D 638 การทดสอบการทนต่อแรงดึง โดยทั่วไปหมายถึง การวัดความสามารถในการรับแรงของวัสดุด้วยการใช้แรงดึง และหาระยะที่ยืดออกไปก่อนที่วัสดุจะแตกหัก Tensile modulus จะมีความสัมพันธ์กับ Stiffness โดยอธิบายได้จากรูปความเค้นส่วนความเครียด

Tensile strength เป็นการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยให้แรงดึงกับชิ้นงานทดสอบที่มี

พื้นที่หน้าตัดคงที่ค่าหนึ่ง Tensile strength คือ อัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้กับพื้นที่ หน้าตัด Elongation เป็นการทดสอบหาความสามารถในการยืด โดยเป็นความยาวที่ยืดออกต่อความยาวเดิม

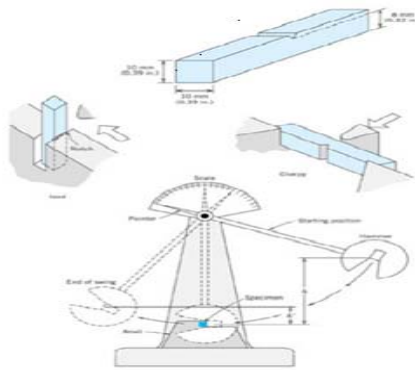
2.10.3 การวัดคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุด้วยการทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานบางประเภท วิศวกรจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ เพื่อประเมินโอกาสการแตกหักเสียหาย และความปลอดภัยในขณะใช้งานในสถานะต่างๆ เช่น การใช้งานเหล็กกล้าทนลิกของรถดัมพ์ที่ต้องรับแรงกระแทกจากการบรรทุกหิน เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน หรือเหล็กสำหรับงานต่อความดันที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรา มักจะประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of Toughness ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งค่า Modulus of Toughness นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย



รูปที่ 2.33 Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว และวัสดุเปราะ [1]

วิธีการทดสอบความเหนียวที่นิยมใช้ คือ การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดค่า Impact Energy, Impact Transition Temperature (ITT) และศึกษาผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของวัสดุ โดยการตีขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน จนเกิดการแตกหัก จุดประสงค์ในการทำการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic Load) ของวัสดุสำหรับค่าที่นิยมวัดมากที่สุดในการทดสอบแรงกระแทก คือ ค่า Impact Energy ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก (Dynamic Impact Force) จนเกิดการแตกหัก โดยมีวิธีการทดสอบมีอยู่ทั้งหมด 2 วิธี ได้แก่ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test เครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [10]

วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกัน คือ จะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่พลังงานที่กระแทกขึ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็ว (เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้ของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่าImpact Energy นั่นเอง มีหน่วยเป็น ฟุตปอนด์ หรือ จูลส์-

ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบากชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปทุกลูกจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้

อุณหภูมิมีผลต่อความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจจะเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ถ้าเรานำค่า Impact Energy มาพล็อตกับอุณหภูมิ เราจะพบว่ามีอุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact Energy ลดลงอย่างรวดเร็วดังภาพที่ 2.33 ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact Transition Temperature (ITT) โดยค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะ คือเปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีค่าพลังงานสูงมาเป็นวัสดุเปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ

ค่า Impact energy จะไม่นำมาใช้โดยตรงในการออกแบบ แต่มันมีประโยชน์ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะพวกเหล็กที่มีค่า ITT อยู่ใกล้กับอุณหภูมิห้อง เราจะต้องระมัดระวัง ไม่ใช้งานวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า ITT ของมัน

โดยทั่วไปเราจะกำหนดค่า ITT เป็นค่าเดียว โดยวิธีในการกำหนดค่า ITT มีอยู่หลายวิธี เช่น การตรวจสอบผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบแรงกระแทก หรือการกำหนดค่า ITT โดยใช้อุณหภูมิที่ผิวรอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีส่วนของพื้นที่ที่เกิดการ

แตกแบบเปราะ)Brittle Fracture) กับพื้นที่ที่แสดงการแตกแบบเหนียว) Ductile Fracture) เป็น 50:50 พอดี (ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Fracture Appearance Transition Temperature, FATT)

สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กำหนดค่า Impact Energy ค่าหนึ่งขึ้นมาเป็นเกณฑ์ โดยควรมีค่ามากกว่าพลังงานที่วัสดุจะได้รับในระหว่างการใช้งาน ถ้าวัสดุใดทดสอบแล้วมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ก็ถือว่าเป็นวัสดุเปราะซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย จึงไม่ควรจะนำมาใช้งาน และกำหนดค่า ITT โดยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบได้ค่า Impact Energy เท่ากับเกณฑ์ที่กำหนดพอดี)ITT ที่กำหนดโดยวิธีนี้เรียกว่า Ductility Transition Temperature) ค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใช้เป็นเกณฑ์คือ 20 จูล์ สำหรับการทดสอบ Charpy V-Notch (ชิ้นงานมีรอยบากรูปตัว V) ดังนั้นวัสดุที่จะนำไปใช้งานจึงควรมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด หรืออาจใช้ค่า Ductility Transition Temperature ในการกำหนดสภาวะการใช้งาน คือ ควรจะใช้งานวัสดุในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า Ductility Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว ของวัสดุ (เปราะ-ความเหนียว)เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบ จะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกัน ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกัน ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ของการเลือกใช้มาตรฐานต่างๆในการทดสอบ

2.11 การทดสอบค่าดัชนีการไหล) Melt flow index, MFIตามมาตรฐาน (ASTM



D1238

รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะเครื่อง MFI

การทดสอบค่าดัชนีการไหล คือ การหาปริมาณเป็นกรัมของพลาสติกหลอมเหลวที่ไหลผ่านหัวคายน์ภายใต้ Specific weight ซึ่งมีหน่วยเป็นอุณหภูมิที่กำหนดภายในเวลา 10 นาที ค่าที่ได้จากการทดสอบของโพลีเมอร์แต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดกับน้ำหนักของโพลีเมอร์

ค่าดัชนีหลอมเหลวสูง - = การไหลของโพลีเมอร์สูง = สายโซ่โมเลกุลสั้น = M_n ต่ำ

- ค่าดัชนีหลอมเหลวต่ำ = การไหลของโพลีเมอร์ต่ำ = สายโซ่โมเลกุลยาว = M_n สูง

เครื่องมือที่ใช้วัดจะประกอบด้วยโลหะแข็งทรงกระบอก มีอุปกรณ์ควบคุมและปรับอุณหภูมิได้ โดยทั่วไปในช่วง)125 องศาเซลเซียส – 300 องศาเซลเซียส + 0.5 องศาเซลเซียส โดยกระบอกโลหะจะใช้ (บรรจุโพลีเมอร์ที่ต้องการทดสอบและส่วนล่างของกระบอกจะมี Capillary die ติดอยู่ใน การทดสอบจะวาง แท่งลูกสูบกดอัดโพลีเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวคายน์ออกมา ซึ่งโพลีเมอร์ที่ออกมาจะถูกตัดเป็นช่วงๆ ตาม เวลาที่ได้กำหนด โดยปกติการหาค่า MFI จะหาได้จากน้ำหนักของโพลีเมอร์ที่ไหลออกมาในเวลา 600 วินาที)10 นาที (ค่า MFI ในบางกรณีใช้เพื่อเป็นตัวแยกชนิดของพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการผลิตหรืออาจใช้ สำหรับการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบเบื้องต้นได้ นอกจากนี้แล้วค่า MFI นี้ยังเป็นค่าซึ่งแสดงให้เห็นถึง ความสามารถในการไหลของพลาสติกในเบื้องต้นว่าพลาสติกที่นำมาหลอมนั้นมีสมบัติทางด้าน Melt strength เป็นอย่างไร แต่โดยปกติเมื่อให้แรงอัดพลาสติกออกมาเป็นเส้นแล้วไม่เกิดการขาด แสดงว่ามี Melt strength ดี

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ / อุปกรณ์ / เครื่องมือ

3.1.1 สารเคมี

(1) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

(2) โพลีโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (Polyolefin Elastomer, POE)

(3) สารตัวเติม คือ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano calcium carbonate, Nano- CaCO_3)

4) สารเชื่อมประสาน POE-G

3.1.2 อุปกรณ์

1) เครื่องชั่งดิจิทัล

2) เกียงทองเหลือง

3) ถาดสแตนเลส

4) แบบแม่พิมพ์ชิ้นงานทดสอบ

5) ถูกันความชื้น

6) ถูมือผ้า

7) ซ้อนดักสาร

8) กระดาษชั่งสาร

9) มีดคัตเตอร์

10) เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) ของ Mitutoyo ความละเอียด 0.02 mm.

11) ปีกเกอร์ขนาด 250 ml.

3.1.3 เครื่องมือ

1) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruders)

2) เครื่องอัดไฮโดรลิก (Compression molding)

3) เครื่องทดสอบวัดความแข็ง (Hardness testing)

4) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

5) เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง

6) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine)

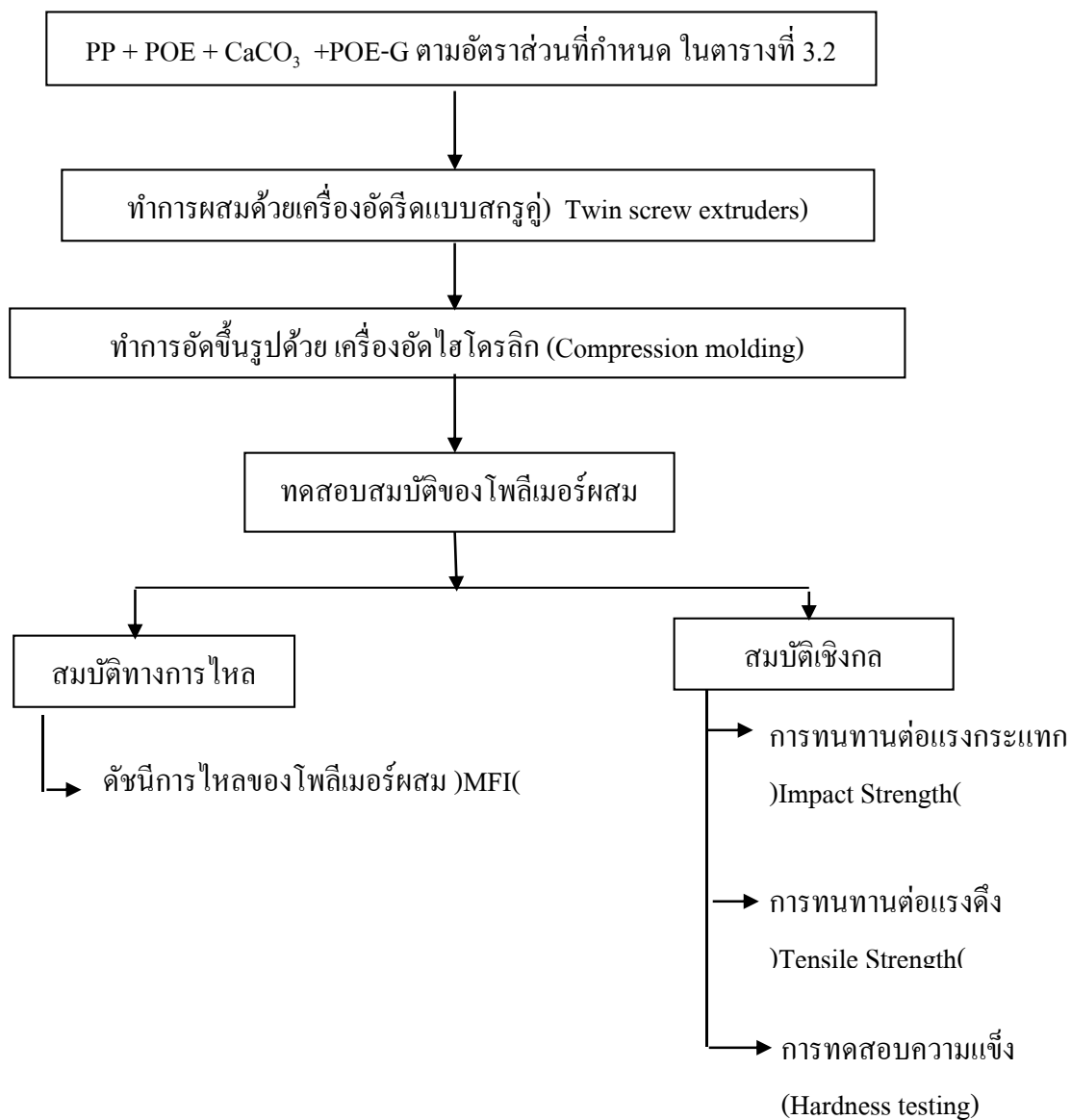
7) เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Index, MFI)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต

Sample	Composition (weight ratio)			
	PP	POE	nano-CaCO ₃	POE-G
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (100/0/0/0)	100	-	-	-
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/0/0)	95	5	-	-
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/5/5)	95	-	5	5
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/0)	95	5	2.5	-
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/7/0)	95	5	7	-
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/1)	95	5	2.5	1
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/3)	95	5	2.5	3
PP/POE/ nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/5)	95	5	2.5	5

3.21. การเตรียมวัสดุคอมโพสิตสามารถเตรียมได้ตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการเตรียมโพลิเมอร์ผสม

3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.3.1. ขั้นตอนการผสมโพลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่



รูปที่ 3.2 การผสมโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ CaCO_3 /POE-G ตามสูตรที่กำหนด

3.3.2 ขั้นตอนการผสมโพลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

1. เตรียม PP/POE/ Nano- CaCO_3 /POE-G ตามสูตรที่กำหนด
2. ผสม PP/POE/ Nano- CaCO_3 /POE-G ลงในถุงเดียวกันแล้วเขย่าให้เข้ากัน
3. นำ PP/POE/ Nano- CaCO_3 /POE-G ที่ผสมกันแล้วเทลงในคอปเปอร์ ของเครื่อง Twin screw extruders
4. เครื่อง Twin screw extruders อัดรีดออกมาเป็นเส้นพลาสติก
5. แยกเส้นพลาสติกที่ได้ออกจากกันเพื่อไม่ให้ติดกัน
6. เครื่องตัดมีดจะตัดเส้นพลาสติกให้เป็นเม็ดเพื่อนำไปขึ้นรูปตามที่ต้องการโดยทำตามขั้นตอนจนครบทั้ง 8 สูตร



(1) สูตรที่ 1 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G
(100/0/0/0)



(2) สูตรที่ 2 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G
(95/5/0/0)



(3) สูตรที่ 3 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G
(95/0/5/5)



(4) สูตรที่ 4 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G
(95/5/2.5/0)



(5) สูตรที่ 5 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G
(95/5/7/0)



(6) สูตรที่ 6 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G
(95/5/2.5/1)



(7) สูตรที่ 7 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G (95/5/2.5/3)

(7) สูตรที่ 7 PP/POE/ Nano-CaCO₃/POE-G (95/5/2.5/5)

รูปที่ 3.3 เม็ดพลาสติกที่ได้จากการผสมของเครื่อง Twin screw extruders แล้วตัดเป็นเม็ด

3.3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบ



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)



(7)

(8)

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Moulding Machine)

3.3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Moulding Machine)

1. เทเม็ดพลาสติกที่ต้องการขึ้นรูปลงในคอปเปอร์ ของเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Moulding Machine)
2. หมุนสวิตช์ Scaew ret หมุนไปทาง RET เครื่องจะฉีดใส่น้ำพลาสติกที่ตกค้าง ออก ไล่ประมาณ 3-4 ครั้ง
3. หมุนสวิตช์จาก Manual ไปที่ Auto เครื่องจะทำการฉีดน้ำพลาสติกเข้าไปใน โมล
4. เมื่อน้ำฉีดเสร็จชิ้นงานจะถูกกระทุ้งออกมา
5. นำชิ้นงานที่ได้ไปแช่น้ำ เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ ชิ้นงานจะได้ไม่หดตัว
6. ตรวจสอบชิ้นงานหลังจากนำไปแช่น้ำ
7. ตัดเก็บชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบ
8. งานเพื่อจะนำไปทดสอบเก็บชิ้น

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

3.4.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240

ASTM D 2240 โดยใช้เครื่อง Durometer ที่อุณหภูมิ $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ เครื่องวัดความแข็งของยางชนิด เอ (Type A) เป็นเครื่องวัดวิเคราะห์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นตัวชี้บอกค่าความแข็งทางด้านยางซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องวัดความแข็งของยางชนิด เอ ที่ใช้เป็นมาตรฐานในปัจจุบันและได้รับการผลิตตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ซึ่งในข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐานสากลเครื่องวัดความแข็งรายละเอียด ชนิด Shore A มีดังนี้

ตารางที่ 3.3 ค่าความแข็ง

ชนิด		การใช้วัสดุ	มาตรฐาน	แรงสปริง นิวตัน (กรัม) ความแข็ง 0-100	ขนาดของหัวกด (มม) ขนาด/ความสูง
A		สำหรับยางทั่วไป/ วัสดุที่มีความยืดหยุ่น	ASTM D 2240	0.550 – 8.050 N	ทรงรูปกรวยปลายตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.79 มม. ทำมุม 35 องศา 2.50 ± 0.04

3.4.1.1 การเตรียมชิ้นงาน

ชิ้นงานทดสอบมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร

3.4.1.2 วิธีการทดสอบ

- 1) กดหัวกดลงบนชิ้นทดสอบด้วยความเร็วและต้องออกแรงกดให้มาพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบ
- 2) เมื่อฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบ จึงอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที
- 3) ทำการวัดความแข็งอย่างน้อย 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่ได้
- 4) สรุปผลการทดสอบ

3.4.2 การทดสอบการทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

จากการทดสอบนี้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน โดยทำการดึงชิ้นงานทดสอบจนขาดออกจากกัน ในขณะเดียวกันจะบันทึกแรงที่ใช้ในการดึง และ ระยะยืดของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องบันทึก การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง ถ้าทำการดึงชิ้นงานที่มีสมบัติแข็งแรงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก ผลจากการวัดแรงที่มากระทำต่อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหักเรียกว่าความเค้นสูงสุดเนื่องจากแรงดึง (Ultimate Tensile Stress) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) แสดงดังสมการการคำนวณที่ 3.1

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad)3.1($$

เมื่อ ε = มอดูลัส)Nm², Pa(
 $\Delta\sigma$ = ความแตกต่างของความเค้นระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง
 $\Delta\varepsilon$ = ความแตกต่างของความเครียดระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

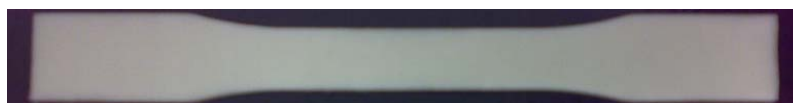
เป็นการดึงชิ้นตัวอย่างทดสอบจนขาดออกจากกัน ในขณะเดียวกันจะมีการบันทึกแรงที่ใช้ในการดึง และระยะยืดของชิ้นตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องบันทึก เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง เมื่อดึงชิ้นตัวอย่างที่มีสมบัติแข็งแรงอย่างต่อเนื่องจนเกิดการแตกหัก ผลจากการวัดแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหัก เรียกว่าความเค้นสูงสุด (Ultimate tensile stress) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึง

3.4.2.1 เตรียมตัวอย่างทดสอบ

ชิ้นงานตัวอย่างการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง เตรียมได้จากการนำชิ้นงานโพลีเมอร์ผสมที่ได้จากการเตรียมให้เป็นแผ่นในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป มาตัดเป็นรูปคัมเบล ด้วยเครื่องตัดชิ้นงานพลาสติกยี่ห้อ Ceast ขนาด $19 \times 168 \times 3$ มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 36



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานสำหรับทดสอบความทนทานต่อแรงดึง

3.4.2.2 วิธีการทดสอบ

- 1) นำชิ้นงานคัมเบล มาติดหมายเลขแต่ละชิ้นงานทดสอบให้ชัดเจน วัดความกว้างและความหนาของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ โดยทำการวัดค่า ช่วง คือ ช่วงต้น ช่วงกลาง และ ช่วงปลาย บันทึกลำค่าที่ได้เพื่อใช้ในการคำนวณ
- 2) ทำการวัด (Gauge length แล้วทำเครื่องหมายแสดงช่วงของ Gauge length
- 3) นำชิ้นงานคัมเบลที่เตรียมไว้ไปทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตร/นาที และ Load cell ขนาด นิวตัน 50
- 4) บันทึกข้อมูล Tensile strength Young's modulus และ Percent strain at break และทำการทดสอบเช่นเดิมกับทุกชิ้นงาน ตัวอย่างละ ชิ้น 10
- 5) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟ หาความสัมพันธ์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

3.4.3 วิธีการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D 256-84

หลักการ เป็นการใช้แรงกระทำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วกระแทกขึ้นตัวอย่างทดสอบให้แตกหักในเวลาอันสั้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกแรงกระแทก ความต้านทานแรงกระแทกจากการตีด้วยค้อนในรูปของพลังงานจลน์ ในหน่วยจูลน์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

3.4.3.1 เตรียมตัวอย่างทดสอบ

ชิ้นงานตัวอย่างการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก เตรียมได้จากการนำชิ้นงานโพลีเมอร์ผสมที่ได้จากการเตรียมให้เป็นแผ่นในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป มาตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานพลาสติก ยี่ห้อ Ceast ขนาด $12.7 \times 64 \times 3$ มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานสำหรับทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

วิธีการทดสอบ

1 (วัดความกว้างและความหนาของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ บริเวณด้านหลังรอยบากของชิ้นงาน บันทึกค่าที่ได้เพื่อใช้ในการคำนวณ

2 (ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติการรับแรงกระแทกของชิ้นงานด้วยวิธีการทดสอบแบบ Izod impact testing โดยนำชิ้นงานยึดกับฐานของเครื่องทดสอบให้แน่นหันด้าน ที่มีรอยบากเข้าหาค้อน ขนาด 2 จูลน์ แล้วทำการปล่อยค้อนตกลงมากระแทกชิ้นงาน

(3บันทึกค่าพลังงานที่ได้จากเครื่อง ในหน่วย จูลน์และทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับทุกชิ้นงาน

(4คำนวณหาค่าพลังงานเฉลี่ยต่อพื้นที่ของรอยแตก ในหน่วย kJ/m²)

การทดสอบการทนทานต่อแรงกระแทกของฟิล์มโดยใช้การวัด Free-Falling Dart ตามมาตรฐาน ASTM D1709

ในการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก จะเป็นการวัดค่าความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกแบบเฉียบพลัน (Stock loading) ซึ่งส่วนมากจะเกิดขึ้นระหว่างการ (ใช้งาน) วิธีการทดสอบแบบง่ายๆ คือ นำถุงพลาสติกตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมาบรรจุทรายแล้วนำไปปล่อยให้ตกจากความสูงระดับต่างๆ เพื่อหาระยะการใช้งานที่ถุงพลาสติกตัวอย่างกระแทกแล้วแตกอย่างไรก็ตาม ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ถุงพลาสติกที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันถึงแม้ว่าจะผลิตจากแผ่นฟิล์มชนิดเดียวกันก็ตาม

วิธีการทดสอบค่าการต้านทานแรงกระแทกโดยวิธี Free-Falling Dart วิธีนี้เป็นการทดสอบโดยพลังงานที่จะทำให้แผ่นฟิล์มพลาสติกแตกทะลุเนื่องจากการตกกระทบของลูกตุ้มมาตรฐาน ภายใต้สภาวะที่กำหนดโดยพลังงานดังกล่าวจะอยู่ในรูปของมวล (Mass) ของลูกตุ้มที่ปล่อยลงมาจากความสูงแล้วส่งผลทำให้ 50% ของแผ่นฟิล์มพลาสติกแตกทะลุในการเลือกใช้ลูกตุ้มมาตรฐานและความสูงที่จะปล่อยลูกตุ้มมาตรฐานลงมากระทบกับแผ่นฟิล์มพลาสติกแล้วทำให้เป็นฟิล์มพลาสติกแตกทะลุ จะต้องสัมพันธ์กันคือ ถ้าลูกตุ้ม ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ 38 มม จะปล่อยลงมาจากความสูง 0.66 มานศูนย์กลางและถ้าลูกตุ้มมีเส้นผ่า . 51 มม จะต้องปล่อยจากความสูง .1.52 มม และในการเลือกใช้ . ลูกตุ้มมาตรฐานและความสูงจะต้องคำนึงถึงมวลของแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ใช้ทดสอบด้วย การคำนวณและผลการคำนวณ

$$w_f = w_0 + (w(A/N - 1/2)) \quad) \quad 3.2($$

เมื่อ	W_f	=	ค่ามวลที่ทำให้แตกทะลุในหน่วยกรัม
	W_0	=	ค่ามวลต่ำสุดในหน่วยที่ทำให้แผ่นฟิล์มพลาสติกแตกทะลุ 100 %
	W	=	ค่ามวลคงที่ที่เพิ่มหรือลดในแต่ละครั้งในหน่วยกรัม
	A	=	ผลรวมของ จำนวนแตกทะลุ) x ลำดับการแตกทะลุ(
	N	=	ผลรวมของจำนวนแผ่นฟิล์มที่มีการแตกทะลุ 100 %

3.5 การทดสอบสมบัติทางไหล

3.5.1 การทดสอบค่าดัชนีการไหล)Melt Flow Index, MFI(

1. การทดสอบค่าดัชนีการไหล)Melt Flow Index, MFI คือ (การหาปริมาณเป็นกรัมของพลาสติกหลอมเหลวที่ไหลผ่านหัวคายน์ภายใต้ Specific Weight ซึ่งมีหน่วยเป็นอุณหภูมิที่กำหนดภายใน

เวลา 10 นาที ค่าที่ได้จากการทดสอบของโพลีเมอร์แต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างเป็นการทดสอบคุณสมบัติการไหลตัวของพลาสติกเหลวจำพวก Thermoplastics ตามมาตรฐาน DIN 53735 (MFI, Melt Flow Index) ASTM D 1238 และ ISO 1133 (MFR, Melt Flow Rate) การทดสอบนี้จะคล้ายกับการ Extrusion คือ เป็นการหลอมเหลวพลาสติกในกระบอกทดสอบ (Cylinder) ด้วยอุณหภูมิที่กำหนดแล้วใช้น้ำหนักกดตามค่าที่กำหนดเช่นกันกดลงบนแท่งกด (Piston) โดยให้แท่งกดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ พลาสติกเหลวก็จะไหลผ่านหัวคายน์ออกมา หลังจากนั้นก็นำพลาสติกที่ไหลออกมาไปชั่งน้ำหนัก เทียบกับเวลา 10 นาที เราจะได้ค่าของ MFI ของพลาสติก ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม /10 นาทีกันขึ้นอยู่กับชนิดกับน้ำหนักของโพลีเมอร์

2. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ 190 °C

บรรจุสารตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้ตามอัตราส่วนต่าง ๆ ตัวอย่างละประมาณ 8 กรัมลงในกระบอกสูบ

- นำ Piston 2.01 กิโลกรัม มาวางลงบน Cylinder เริ่มจับเวลา เก็บตัวอย่าง และคำนวณหาค่า

MFI

$$MFR = 10W / T \quad (3.3)$$

กำหนดให้:

MFR = ค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Rate in grams / 10 minutes)

W =) ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของพลาสติกหลอมไหล Average weigh of extruded in gram)

T = ช่วงเวลาที่ตัดของพลาสติกหลอมไหล (The extrusion time per sample in minutes)

โพลีเมอร์เหลวถูกอัดให้ไหลออกจากปลายกระบอกสูบด้วยความดัน ซึ่งได้จากการใส่ค้อนน้ำหนักคงที่ ที่วางอยู่บนปลายด้านบนของลูกสูบ ค่าดัชนีการไหลคือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ไหลออกจากปลายท่อในหน่วยกรัมต่อเวลา ซึ่งใช้เวลาการทดสอบ 10 นาที



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบดัชนีการไหล [9]

3. วิธีการทดสอบ

- 1) ก่อนทำการทดสอบควรทำความสะอาดกระบอบอกสูบและลูกสูบด้วยตัวทำละลายร้อน แล้วเช็ดสิ่งสกปรกทั้งหมดออก
- 2) ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบที่ 190°C เป็นเวลา นาที หรือจนกระทั่งอุณหภูมิ 15 คงที่
- 3) บรรจุสารตัวอย่าง โดยมีน้ำหนักประมาณ 8 กรัม ลงในกระบอบอกสูบ
- 4) นำน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม มาวางลงบนก้านกดน้ำหนัก จากนั้นเริ่มจับเวลาเมื่อโพลีเมอร์ผสมไหลออกมาจากหัวคายน์แต่ละชั้น ตั้งทิ้งไว้ วินาที 10
- 5) เก็บตัวอย่างจากหัวคายน์ อย่างน้อย ตัวอย่าง 5
- 6) ปลดปล่อยหัวคายน์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่าดัชนีการไหล

4. วิธีทดสอบตาม Method B

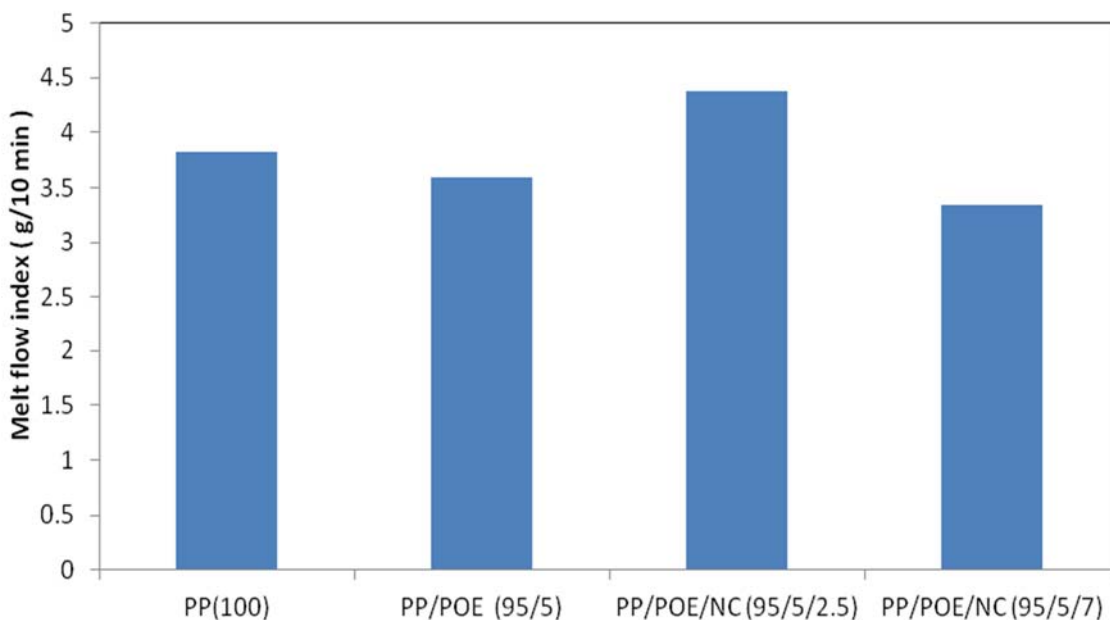
- 1) ก่อนการทดสอบ ให้กำหนดค่าระยะของการวัดของ AFRT หรือ ตัววัดระยะ
- 2) นำ piston support sleeve ออก เริ่มการทดสอบ
- 3) ขณะที่ piston เคลื่อนลงจนขีดของ scribed mark ตัวล่างอยู่ในระดับเดียวกับขอบบนของ barrel เครื่องทดสอบ MFI จะเริ่มจับเวลาโดยอัตโนมัติ และจะหยุดเมื่อถึงระยะที่ตั้ง
- 4) ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้จะเป็นค่า MVR มีหน่วยเป็น CC/10 mins

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

4.1 ศึกษาพฤติกรรมทางการไหล

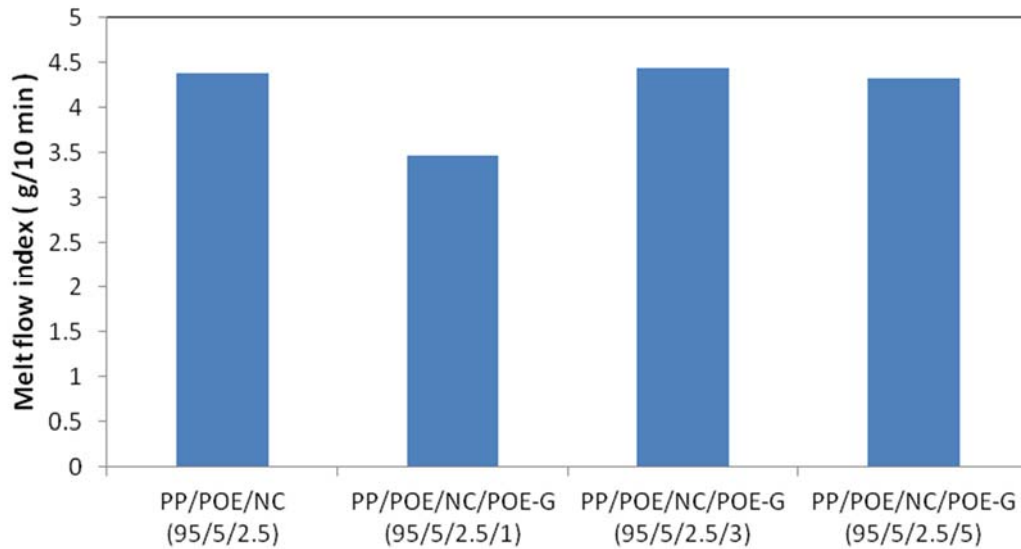
4.1.1 ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index)

จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหล ที่อุณหภูมิ 230° C ใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ° 23C



รูปที่ 4.1 ผลของปริมาณ Nano-CaCO₃ ต่อดัชนีการไหลของ PP/POE ที่อัตราส่วน 95/5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.1 แสดงค่าดัชนีการไหลของ PP และโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE โดยมีการผสม Nano-CaCO₃ ที่ 0, 2.5 และ 7 %โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเติม POE ลงไปใน PP phase ส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลลดลงเล็กน้อยจาก 3.822 g/10 min เป็น 3.6 g/10 min แต่หลังจากที่มีการเติมด้วยสารตัวเติม Nano-CaCO₃ ลงไปเพียง 2.5 wt% การไหลเพิ่มขึ้นเป็น 4.38 g/10 min และลดลงเมื่อเติม Nano-CaCO₃ มากขึ้น

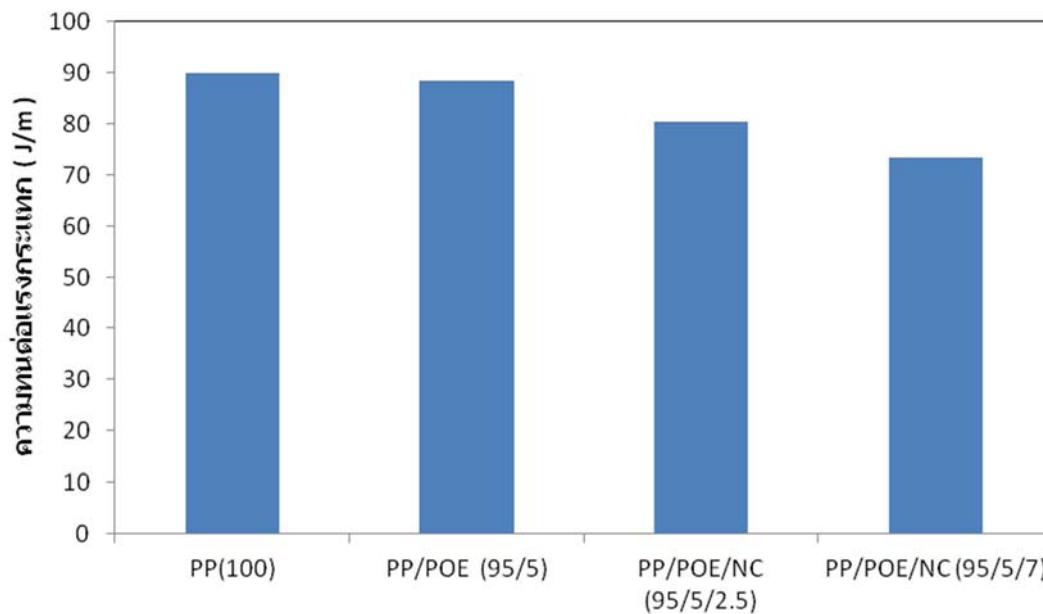


รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณ POE-G ต่อดัชนีการไหลของ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่อัตราส่วน 95/5/2.5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าดัชนีการไหลของโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano-CaCO₃ และ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่มีการผสม POE-G ที่ 1,3 และ 5 % โดยน้ำหนัก พบว่า POE-G จะช่วยเสริมสมบัติให้ PP/POE/ Nano-CaCO₃ เข้ากันได้ดี เมื่อผสม POE-G ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก และทำให้โพลิเมอร์ผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลลดลง เมื่อเติม POE-G เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของโพลิเมอร์ผสมมีความหนืดลดลงส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น

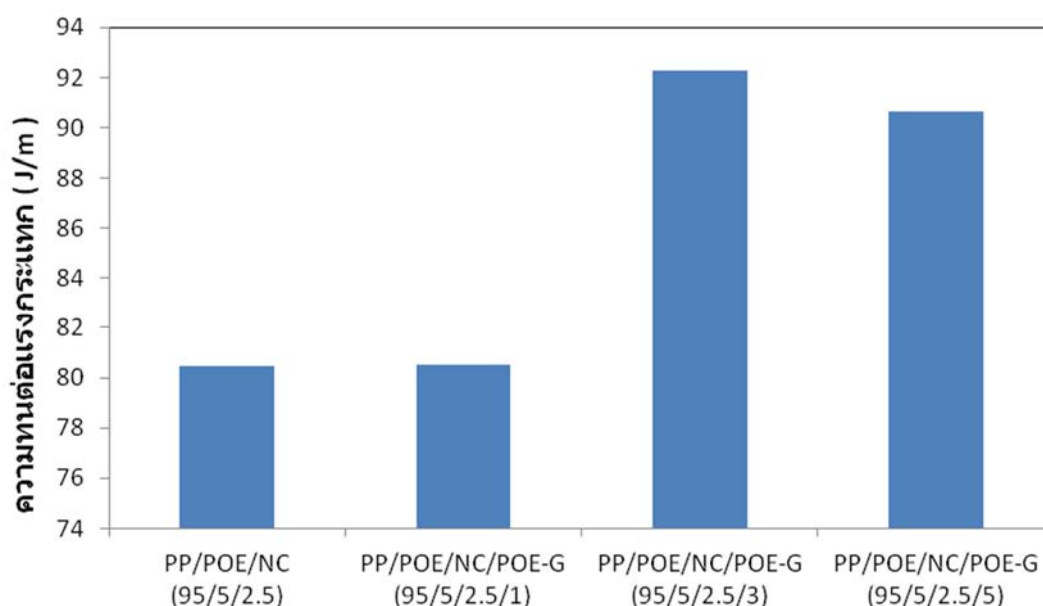
4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.2.1 การทดสอบค่าการต้านทานแรงกระแทกแบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง ingsaเซลเซียส 23



รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณ Nano- CaCO_3 ต่อความทนต่อแรงกระแทกของ PP/POE ที่อัตราส่วน 95/5 (NC คือ Nano- CaCO_3)

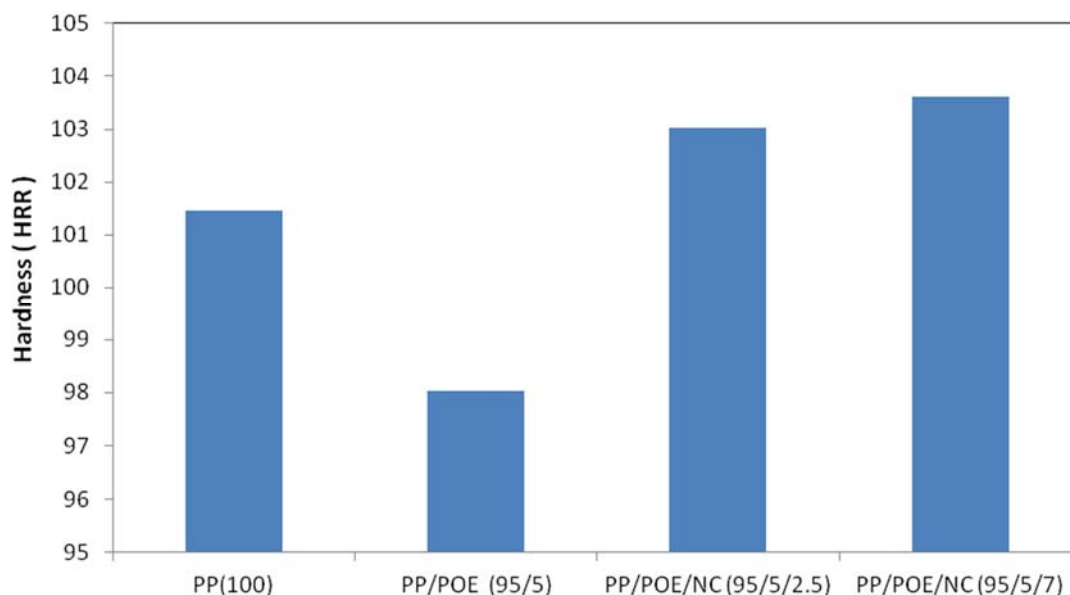
จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าความทนต่อแรงกระแทกของ PP และโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE โดยมีการผสม Nano- CaCO_3 ที่ 0, 2.5 และ 7 % โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาความทนต่อแรงกระแทก จะพบว่าเมื่อเติม Nano- CaCO_3 มากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกลดลง เพราะเมื่อผสม Nano- CaCO_3 ในปริมาณมากขึ้น จะทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความแข็งเพิ่มขึ้นแต่จะเปราะและการทนต่อแรงกระแทกจะลดลง



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณ POE-G ต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกของ PP/POE/ Nano- CaCO_3 ที่อัตราส่วน 95/5/2.5 (NC คือ Nano- CaCO_3)

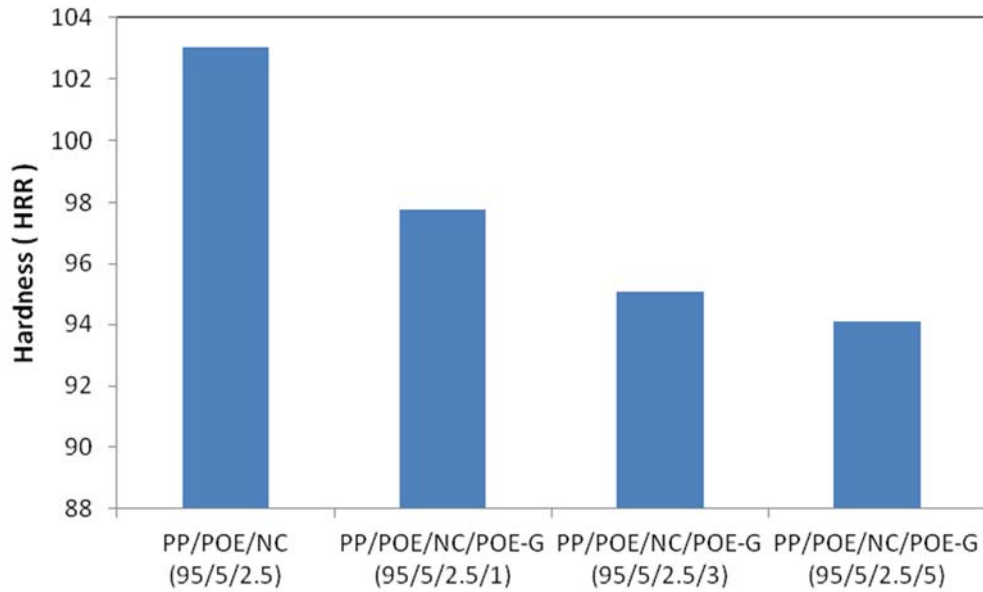
จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าความทนต่อแรงกระแทกของโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano- CaCO_3 และโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano- CaCO_3 ที่มีการผสม POE-G ที่ 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาความทนต่อแรงกระแทก จะพบว่าเมื่อผสม POE-G เข้าไปช่วยทำให้โพลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดี ชิ้นงานจะมีความทนต่อแรงกระแทกมากขึ้นเนื่องจาก สามารถดูดซับพลังงานได้มากโดยการเติม POE-G ลงไป 3 wt% จะทำให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงสุดที่ 92.263 J/m และเมื่อเติม POE-G ลงไป 5 wt% จะส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกลดลง และยังคงสูงกว่า PP/POE/ Nano- CaCO_3 95/5/2.5 ที่ไม่มีการเติมด้วยสารเชื่อมประสาน

4.2.2 การทดสอบค่าความแข็ง(Hardness) แบบ Rockwell ตามมาตรฐาน ASTM 785 โดยทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง องศาเซลเซียส ใช้หัวกด $23\frac{1}{2}$ น้ำหนักกด 60N



รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณ Nano-CaCO₃ ต่อค่าความแข็งของ PP/POE ที่ อัตราส่วน 95/5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งของ PP และ โพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE โดยมีการผสม Nano-CaCO₃ ที่ 0, 2.5 และ 7 %โดยน้ำหนัก จากการทดสอบจะพบว่า ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เมื่อ ปริมาณ Nano-CaCO₃ มากขึ้น เมื่อเทียบกับ PP/POE (95/5) เนื่องจาก ผลของการเติมสารตัวเติม Nano-CaCO₃ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นพบค่าสูงสุดที่ 96.23 HHRใน PP/POE/ Nano-CaCO₃ (95/5/7)

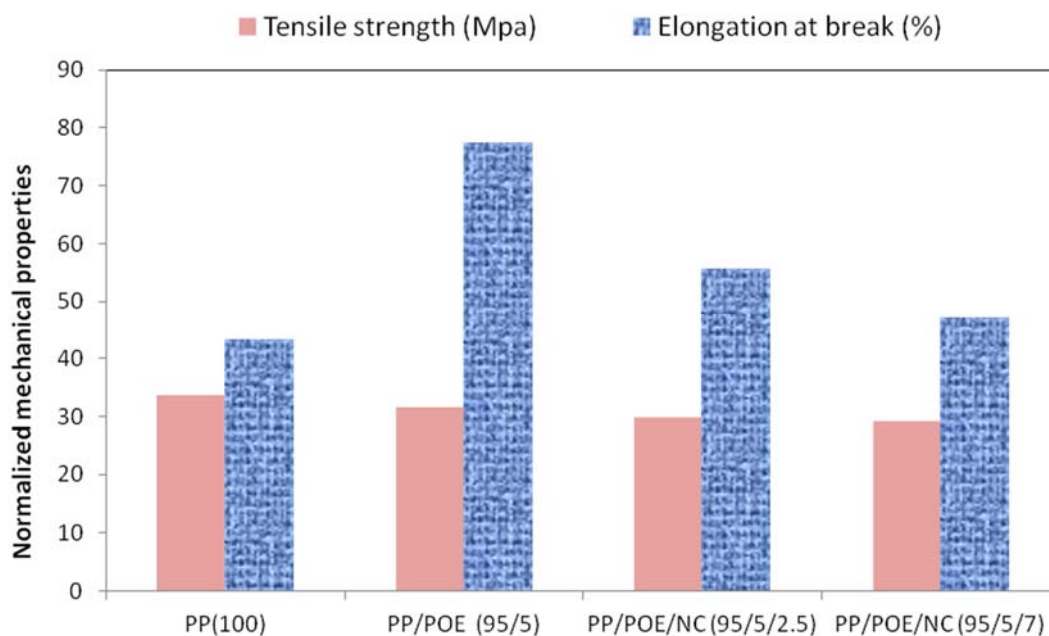


รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณ POE-G ต่อค่าความแข็งของ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่อัตราส่วน 95/5/2.5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano-CaCO₃ และ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่มีการผสม POE-G ที่ 1,3 และ 5 % โดยน้ำหนัก จากการทดสอบจะพบได้ว่าเมื่อเติม POE-G ลงไป 1,3 และ 5 wt% ลงใน PP/POE/ Nano-CaCO₃ (95/5/2.5) จะเข้าไปช่วยทำให้ค่าความแข็งที่ผิวหน้าลดลง เป็น 97.78 HRR ,95.08 HRR และ 94.80 HRR ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก POE-G นั้นเป็นสารกลุ่มอีลาสโตเมอร์ ทำให้ลดค่าความแข็งลง เมื่อเติมลงในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

4.2.3 ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

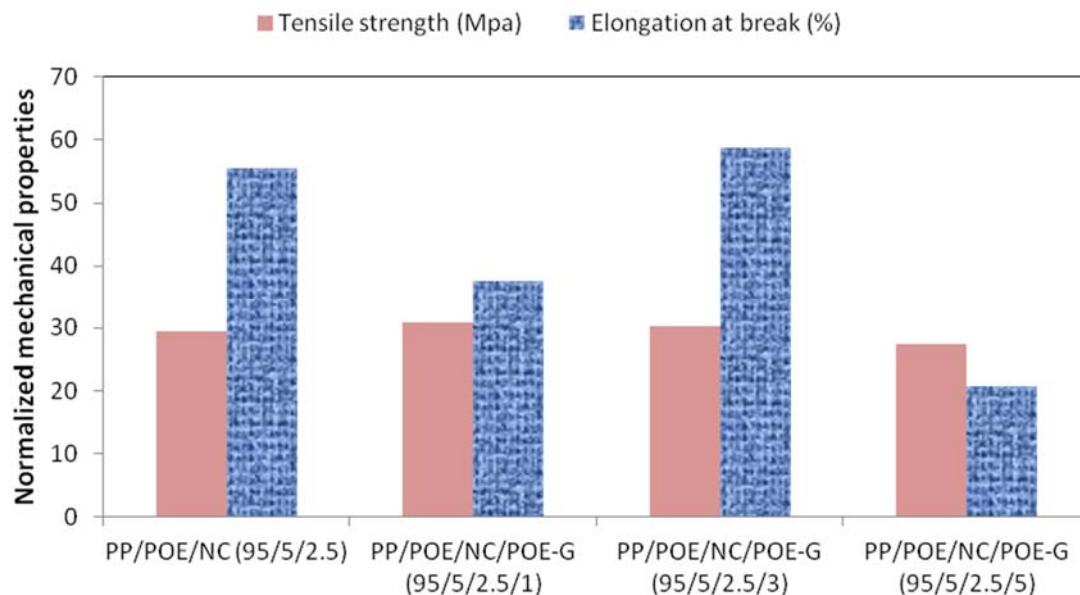
การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D ของโพลิเมอร์ผสม 84-638 ระหว่าง PP/POE/ CaCO₃/POE-G ตามสูตรที่กำหนด สามารถวัดความทนทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ฃน จุดขาด และค่ายังัสมัอดูลัส



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณ Nano-CaCO₃ ต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ฃน

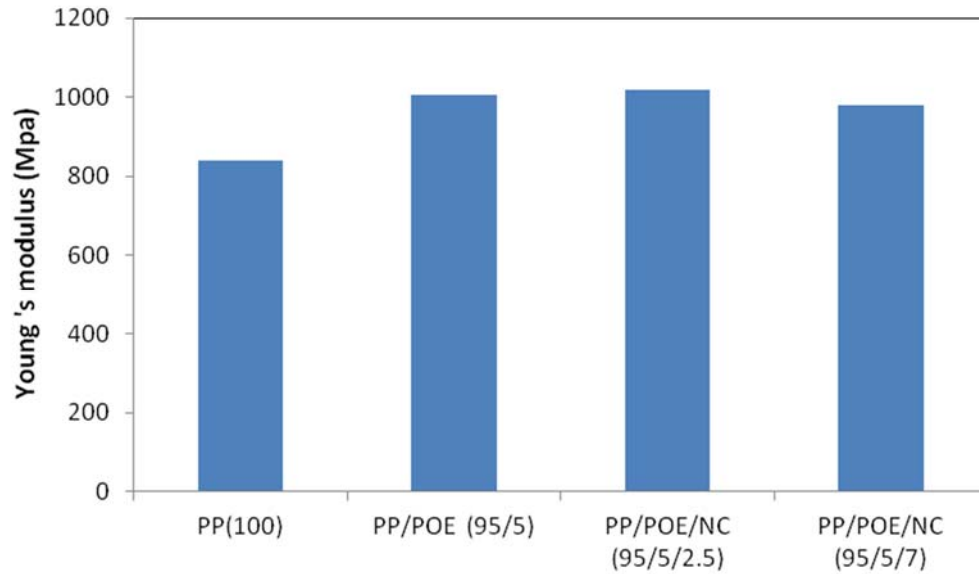
ฃน จุดขาด ของ PP/POE ที่อัตราส่วน 95/5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าความทนทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ฃน จุดขาด ของ PP และโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE โดยมีการผสม Nano-CaCO₃ ที่ 0, 2.5 และ 7 %โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่า การเติม POE ลงไปใน PP ส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย แต่ค่าการยืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก (ประมาณ 2 เท่า) ยิ่งไปกว่านั้นการเติม Nano-CaCO₃ ลงไปในระบบ PP/POE ส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ค่าการดึงยืดลดลง ตามปริมาณ Nano-CaCO₃ ที่เพิ่มขึ้น โพลิเมอร์คอมโพสิตทั้งหมดมีค่าการทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกับ PP บริสุทธิ์ เนื่องจากปริมาณ POE ที่เติมลงต่ำเกินไป และ Nano-CaCO₃ นั้นน้อยเกินไปที่จะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงในระบบนี้ได้



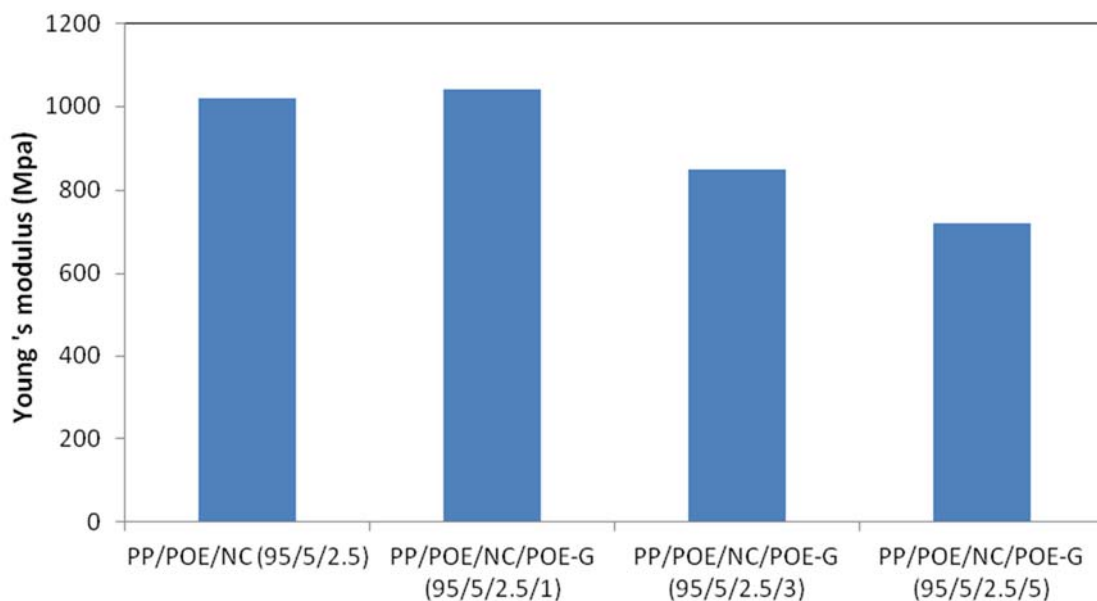
รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณ POE-G ต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่อัตราส่วน 95/5/2.5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความทนทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano-CaCO₃ และ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่มีการผสม POE-G ที่ 1,3 และ 5 % โดยน้ำหนัก ผลการศึกษา พบว่าปริมาณที่มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมากที่สุดที่ปริมาณ POE-G เท่ากับ 3% โดยน้ำหนัก ทำให้โพลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และที่อัตราส่วนของโพลิเมอร์ผสมอื่นๆ อาจจะเข้ากันได้ได้น้อยกว่า ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมากที่สุด และค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 29.54 Mpa ของ PP/POE/Nano-CaCO₃ (95/5/2.5) เป็น 30.97 Mpa , 30.35 Mpa และ 27.39 Mpa ตามลำดับของระบบที่เติมด้วย POE-G ลงไป 1,3 และ 5 wt% ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณ Nano-CaCO₃ ต่อค่ายังส์มอดุลัส ของ PP/POE ที่อัตราส่วน 95/5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่ายังส์มอดุลัส ของ PP และโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE โดยมีการผสม Nano-CaCO₃ ที่ 0, 2.5 และ 7 % โดยน้ำหนัก จากการทดสอบจะพบว่า เมื่อผสม Nano-CaCO₃ เข้าไปชิ้นงานจะสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำได้ดีกว่าเดิม คือ เพิ่มจาก 1006.4 Mpa เป็น 1019 Mpa เมื่อเติมด้วย Nano-CaCO₃ 2.5 wt%



รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณ POE-G ต่อค่ายังส์มอดุลัส ของ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่อัตราส่วน 95/5/2.5 (NC คือ Nano-CaCO₃)

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าค่ายังสัมมูลิต์ ของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano-
CaCO₃ และ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่มีการผสม POE-G ที่ 1,3 และ 5 %โดยน้ำหนัก จากการทดสอบ จะ
พบว่าปริมาณที่มีความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างมากที่สุดที่เมื่อมีแรงกระทำคือปริมาณ
POE-G เท่ากับ 1%โดยน้ำหนัก ทำให้โพลีเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และที่อัตราส่วนของโพลี
เมอร์ผสมอื่นๆอาจจะเข้ากันได้น้อยกว่า ส่งผลให้ค่ายังสัมมูลิต์ ของปริมาณ POE-G เท่ากับ 1%โดยน้ำหนัก
มีค่ามากที่สุด

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการผสมโพลีเมอร์ระหว่าง โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และโพลีโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (Polyolefin Elastomer, POE) สารเชื่อมประสาน คือโพลีโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ กราฟต์ (Polyolefin Elastomer, POE-G) และเสริมแรงด้วยสารตัวเติมอนินทรีย์คือ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano calcium carbonate, Nano-CaCO₃) ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นทดสอบเพื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆ สามารถสรุปผลได้ว่า

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบสมบัติทางการไหลและสมบัติเชิงกลของ PP และโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE โดยมีการผสม Nano-CaCO₃ ที่ 0, 2.5 และ 7 % โดยน้ำหนัก

- การทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index) พบว่า Nano-CaCO₃ จะเพิ่มดัชนีการไหลของโพลีเมอร์ผสม

- การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) พบว่า เมื่อเติม Nano-CaCO₃ มากขึ้นจะยิ่งทำให้การทนต่อแรงกระแทกลดลง

- การทดสอบความแข็ง (Hardness testing) พบว่า Nano-CaCO₃ จะเพิ่มความแข็งให้กับโพลีเมอร์ผสม

- การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเนื่องจากการเติม POE ที่ต่ำเกินไป และปริมาณ Nano-CaCO₃ ที่น้อยเกินไป จึงทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงในระบบนี้ไม่ได้

- การทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) พบว่าเมื่อเติม POE ลงใน PP โพลีเมอร์ผสมจะเข้ากันได้ดี ทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สูงมากเมื่อเติม Nano-CaCO₃ ลงไปค่าการยืดจะลดลง ตามปริมาณของ Nano-CaCO₃

- การทดสอบการทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำ (Young 's modulus) พบว่าเมื่อเติม POE ลงใน PP จะทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างได้สูงมาก เมื่อเติม Nano-CaCO₃ ลงไป ค่าการทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

จากการทดสอบสมบัติทางการไหล และสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano-CaCO₃ และ PP/POE/ Nano-CaCO₃ ที่มีการผสม POE-G ที่ 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก

- การทดสอบดัชนีการไหล พบว่า การเติม POE-G เข้าไป โพลีเมอร์ผสมจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อปริมาณ POE-G เพิ่มขึ้น

- การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) พบว่าเมื่อเติม POE-G เข้าไปโพลิเมอร์ผสมจะมีความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

- การทดสอบความแข็ง (Hardness testing) พบว่า POE-G จะทำให้ความแข็งของโพลิเมอร์ผสมลดลง

- การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเนื่องจากการเติม POE ที่ต่ำเกินไป และปริมาณ Nano-CaCO₃ ที่น้อยเกินไป จึงทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงในระบบนี้ไม่ได้

- การทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) พบว่าการเติม POE-G ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด จะสูงขึ้น และจะลดลงเมื่อปริมาณ POE-G เพิ่มขึ้น

- การทดสอบการทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำ (Young's modulus) พบว่าค่าการทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะลดลงเมื่อปริมาณ POE-G เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาหาสารในการทำให้โพลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ (Compatibility) ที่เหมาะสม ซึ่งทำให้โพลิเมอร์ทั้งสามชนิดผสมเข้ากันได้ดี เนื่องจากปกติแล้วโพลิเมอร์ที่ผสมกันโดยไม่ใช้สารเชื่อมประสานโพลิเมอร์มีความเข้ากันได้เพียงบางส่วนเท่านั้น การใช้ Graft copolymer เป็นการเชื่อมให้โพลิเมอร์ทั้งสามเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน

2. จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารตัวเติมเข้าไปทำให้โพลิเมอร์ผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดีในบางสูตรดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มในส่วนของการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่เหมาะสม

3. ควรศึกษาเพิ่มเติมในการดูภาพด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM)

เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์ และคณะ. 2547. **วัสดุคอมโพสิต**. [ออนไลน์] เข้าถึงจาก :[http : // wikipedia.org/wiki/composites](http://wikipedia.org/wiki/composites). (17 กันยายน 2554)
- [2] วลัยพร มุขสุวรรณ และคณะ. 2551. พลาสติกในชีวิตประจำวัน ตอนที่ 7 โพลีโพรพิลีน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.chemtrack.org>. (17 กันยายน 2554)
- [3] วิกิพีเดีย (Wikipedia). **พลาสติกชนิดต่างๆ**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :<http://th.wikipedia.org/wiki/อ้อย> (17 กันยายน 2553)
- [4] วิกิพีเดีย (Wikipedia). **โพลีเมอร์**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :<http://th.wikipedia.org/wiki/อ้อย> (17 กันยายน 2553)
- [5] สิริพัฒน์ ปรีทอนคทพ. **นาโนเทคโนโลยี... คืออะไรกันแน่?** [ออนไลน์] เข้าถึงจาก :<http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?Aid=189&page=5>.
- [6] Sacred Heart Convent School. **ความรู้เบื้องต้นเรื่องมะพร้าว**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :<http://www.shc.ac.th/learning/botanical-garden/Coconut/coconut03.htm> (15 กันยายน 2553)
- [7] เจริญ นาคะสรรค์. 2546. **เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก (Introduction to plastic technology)**. กรุงเทพฯ : โฟร์เพช.
- [8] พงษ์ธร แซ่ฮุย, และชาคริต สิริสิงห. 2550. **ยาง : กระบวนการผลิตและการทดสอบ**. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [9] มณฑล ฉายอรุณ และคณะ. **การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ**. [ออนไลน์] เข้าถึงจาก :<http://www.isit.or.th/>
- [10] พรสุดา โทรานนท์ และคณะ 2541 .**การศึกษาลักษณะการเกิดโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตตามวิถุภาคของ พอลิโพรพิลีน, อีลาสโตเมอร์ และฟิเลเลอร์** . [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก(<http://www.thaithesis.org/detail.php?id=42735>) (14 ตุลาคม 2554)
- [11] L. Szazdi และคณะ 2005. **การศึกษาพอลิโพรพิลีนเคลือบ คอมโพสิต/** . [ออนไลน์] เข้าถึงจาก :<http://www.sciencedirect.com/>
- [12] J.Z. Liang และคณะ 2006. **การศึกษาการคอมโพสิตระหว่าง นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และ โพลีโพรพิลีน** . [ออนไลน์] เข้าถึงจาก <http://www.sciencedirect.com/>
- [13] M.U.Wahit และคณะ 2009. **Ethylene-octene copolymer (POE) toughene polyamide/polycomposites:Effect of POE maleation**. <http://www.sciencedirect.com/>

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในหัวข้อการเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโอเลฟิน/อีลาสโตเมอร์/นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้งานด้านวัสดุนยนต์สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ จากองค์กรบุคคลต่างๆดังนี้

1. ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องจักรและเครื่องทดสอบต่างๆ เป็นอย่างดี
2. ขอขอบคุณ บริษัท ทีมพลาสติกคอล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องจักรในการทำโครงการวิจัยตลอดจนเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
3. ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2555 ในครั้งนี้

คณะผู้วิจัย

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. กุลวดี สังข์สนิท วารุณี อริยวิริยะนันท์ และ วรณศิริ จักรบุตร “การเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโอเลฟิน/อีลาสโตเมอร์/นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้งานด้านวัสดุนยนต์”
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ, 15-16 มิถุนายน 2556.

การเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโพลิเอทิลีนนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต/อีลาสโตเมอร์/
สำหรับใช้งานด้านวัสดุยานยนต์
Preparation and Properties of ternary polyolefin/elastomer/nano-CaCO₃ composites use for
automobile materials

กุลวดี สังข์สนธิ¹, วารุณี อริยวิริยะนันท์,^{2*} และ วรณศิริ จักรบุตร²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จ1 ปทุมธานี.2 110

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จ1 ปทุมธานี.2110

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างโพลิเอทิลีนนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้งาน/อีลาสโตเมอร์/ด้านวัสดุยานยนต์ โดยทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตผสมแบบสามเฟสระหว่างโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP), โพลิโพลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์ (Polyolefin elastomer, POE) สารตัวเติมอินทรีย์คือ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-calcium carbonate, NC) และสารเชื่อมประสานคือ (Polyolefin elastomer-G, POE-G) โดยออกแบบสูตรวัสดุคือ PP/POE (95/5) ทำการแปรปริมาณของ NC เป็น 7 และ 5,2.5phr ตามลำดับ และมีการเติมด้วย POE-G ในปริมาณ 5 และ 3,1phr ตามลำดับ โดยใช้กระบวนการบดผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) นำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (Compression molding) เป็นแผ่นทดสอบชิ้นงาน และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลและค่าดัชนีการไหล จากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมด้วย POE และ NC ลงใน PP ทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลงจาก 3.8g/10 min เป็น 3.6g/10 min แต่เมื่อผสมด้วย POE-G ในปริมาณ 5-1phr ลงใน PP/POE/NC (95/5/2.5) ส่งผลให้โพลิเมอร์มีค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเข้ากันได้ของโพลิเมอร์ ค่าการทนต่อแรงกระแทก (Impact) พบว่า เมื่อเติมด้วย POE และ NC ลงใน PP ทำให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกลดลงแต่เมื่อผสมด้วย POE-G ในปริมาณเพียง 3phr ลงใน PP/POE/NC (95/5/2.5) ส่งผลให้วัสดุนี้มีค่าการทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจาก 80J/m เป็น 93J/m สารประสานดังกล่าวส่งผลอย่างมากต่อสมบัตินี้ และค่าความแข็งที่ผิวหน้ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน การเติมด้วย POE-G ไม่ส่งผลต่อสมบัติด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) กล่าวคือค่าการทนต่อแรงดึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า Young's modulus เมื่อเติมด้วย POE และ NC ลงใน PP ทำให้ค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นจาก 1,006MPa เป็น 1,019MPa แต่เมื่อผสมด้วย POE-G ในปริมาณ 5-1phr ลงใน PP/POE/NC (95/5/2.5) ส่งผลให้ค่า Young's modulus ลดลงตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าปริมาณของ POE-G ที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างมากที่สุดเมื่อมีแรงกระทำคือ 1phr ทำให้โพลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีกว่า

คำสำคัญ : วัสดุคอมโพสิต โพลิโพรพิลีน โพลิโพลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

Keywords : Composite materials, Polypropylene, Polyolefin elastomer, Nano-calcium carbonate

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ warunee.a@en.rmutt.ac.th โทร 5-3484 2549 0 .

ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) การทดสอบค่าการต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด
ณ จุดขาด และค่ายังส์โมดูลัส (Young 's modulus)

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 มาตรฐานในการทดสอบ ของเม็ดพลาสติก โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)

ITEM	PROPERTIES	TEST METHOD	UNIT	RESULT
1	Melt Flow Index(230/2.16)	ASTM D 1238	g/10min	4.1
2	Charpy Notched Impact at 23 C	DIN 53453	mJ/mm ²	4.1
3	Flexural Modulus	ASTM D 790	MPa	1515

ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index)

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของโพลิเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ Nano-CaCO₃ / POE-G ที่อัตราส่วนต่างๆ ของสูตรที่ใช้ในการทดสอบ

สูตรที่ใช้ในการทดสอบ	ดัชนีการไหล /กรัม)10 นาที(
1. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/0/0)	3.822
2. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/0/0)	3.6
3. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/5/5)	3.72
4. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/0)	4.38
5. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/7/0)	3.342
6. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/1)	3.474
7. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/3)	4.446
8. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/5)	4.326

ค่าการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength)

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงกระแทกของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ CaCO₃/POE-G ที่อัตราส่วนต่างๆ ของสูตรที่ใช้ในการทดสอบ

สูตรที่ใช้ในการทดสอบ	ความทนทานต่อแรงกระแทก)J/m (
1. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/0/0)	89.901
2. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/0/0)	88.532
3. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/5/5)	90.665
4. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/0)	80.463
5. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/7/0)	73.33
6. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/1)	80.53
7. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/3)	92.263
8. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/5)	90.662

ค่าการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) แบบ Rockwell

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบความแข็งของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PP/POE/ CaCO₃/POE-G

สูตรที่ใช้ในการทดสอบ	การทดสอบความแข็ง)HRR (
1. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/0/0)	101.45
2. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/0/0)	98.02
3. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/5/5)	90.79
4. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/0)	103.03
5. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/7/0)	103.62
6. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/1)	97.78
7. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/3)	95.08
8. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/5)	94.80

ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง)Tensile strength)

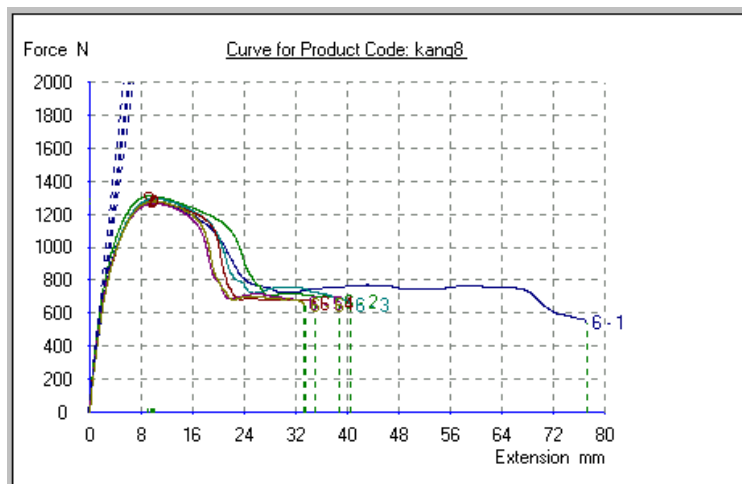
ตารางที่ ก -5 ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ายังส์ โมดูลัส ของโพลิเมอร์ผสมระหว่าง .PP/POE/ Nano-CaCO₃ /POE-G ตามสูตรที่กำหนดไว้

สูตรที่ใช้ในการทดสอบ	ค่าความทนทาน ต่อแรงดึง (Mpa)	ค่าระยะการยืด ณ จุดขาด)%(	ค่ายังส์มอดูลัส (MPa)
1. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/0/0)	33.34	43.00	839.5
2. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/0/0)	31.25	77.26	1006.4
3. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/0/5/5)	27.38	146.88	956.4
4. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/0)	29.54	55.47	1019.4
5. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/7/0)	28.93	46.90	980.7
6. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/1)	30.97	37.62	1041.2
7. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/3)	30.35	58.85	849.6
8. PP/POE/ Nano-CaCO ₃ /POE-G (95/5/2.5/5)	27.39	20.73	719.7

ภาคผนวก ข

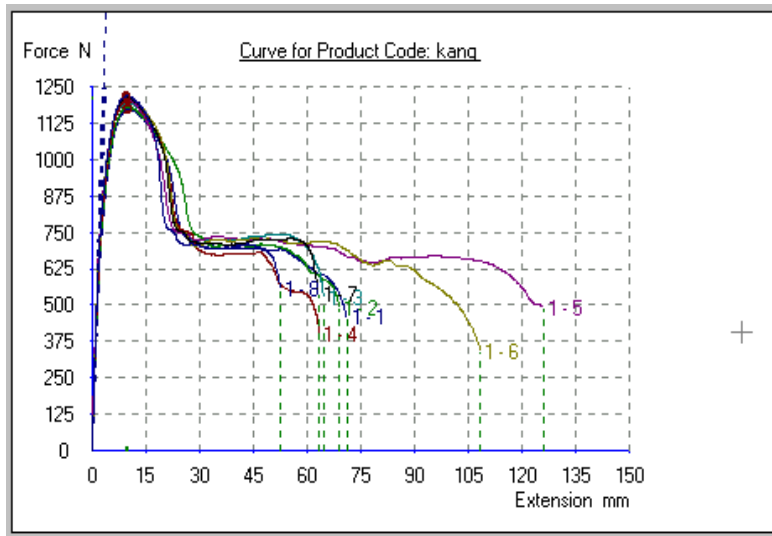
กราฟผลการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง)Tensile strength)

ผลการทดสอบค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่า ย้งส์โมดูลัส



รูปที่ ข-1 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 1 PP (100)

Batch	E.Modulus MPa	Yield MPa	Max Stress MPa	Elong at Break %	Thickness mm	Width mm
1 - 1	868	32.97	32.97	77.20	3.000	12.80
1 - 2	981	34.11	34.11	38.72	3.000	12.80
1 - 3	763	33.70	33.70	40.40	3.000	12.80
1 - 4	773	33.07	33.07	35.08	3.000	12.80
1 - 5	835	32.92	32.92	33.20	3.000	12.80
1 - 6	817	33.28	33.28	33.40	3.000	12.80
n	6	6	6	6	6	6
Mean	839.5	33.34	33.34	43.00	3.000	12.800
Median		826	33.18	33.18	36.90	3.000 12.80
Std. Dev.		79.740	0.4733	0.4733	17.004	0 0
Range	219	1.20	1.20	44.00	0	0
Maximum		981	34.11	34.11	77.20	3.000 12.80
Minimum		763	32.92	32.92	33.20	3.000 12.80

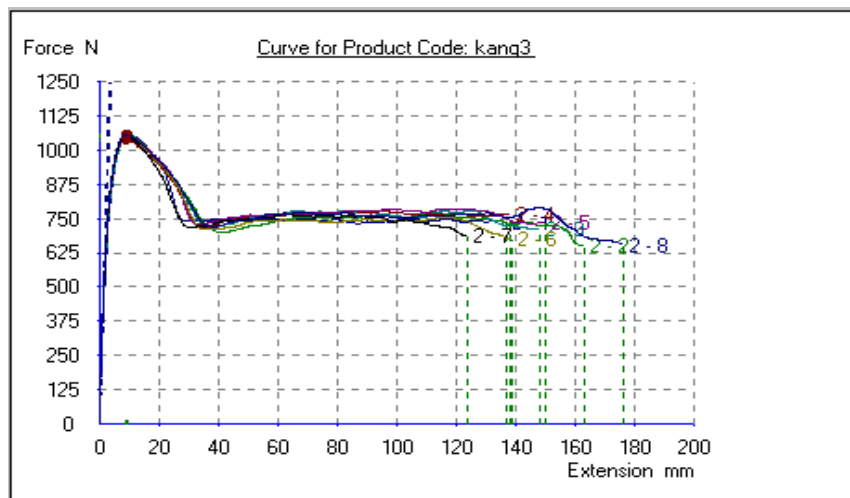


รูปที่ ข-2 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 2 PP/POE/

Nano-

CaCO₃ /POE-G (95/5/0/0)

Batch	E.Modulus		Yield	Max Stress		Elong at Break	Thickness	Width
	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm		
2 - 1	868	30.50	30.50	71.1	3.000	12.80		
2 - 2	960	30.73	30.73	68.9	3.000	12.80		
2 - 3	1024	31.15	31.15	64.6	3.000	12.80		
2 - 4	997	31.28	31.28	63.4	3.000	12.80		
2 - 5	1050	31.45	31.45	126.0	3.000	12.80		
2 - 6	1026	31.61	31.61	108.5	3.000	12.80		
2 - 7	1069	31.58	31.58	63.1	3.000	12.80		
2 - 8	1056	31.74	31.74	52.5	3.000	12.80		
n	8	8	8	8	8	8		
Mean	1006.4	31.25	31.25	77.26	3.000	12.800		
Median		1025	31.36	31.36	66.8	3.000	12.80	
Std. Dev.		65.803	0.4397	0.4397	25.710	0	0	
Range	201	1.24	1.24	73.5	0	0		
Maximum		1069	31.74	31.74	126.0	3.000	12.80	
Minimum		868	30.50	30.50	52.5	3.000	12.80	

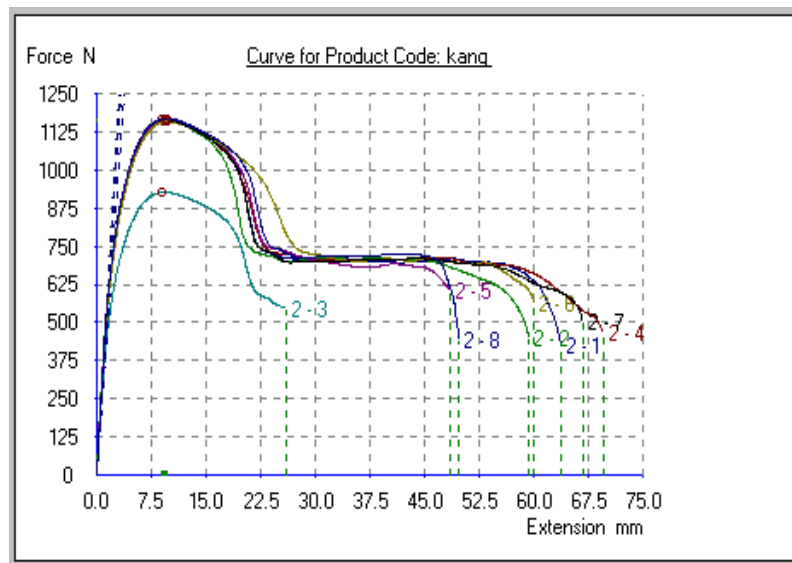


รูปที่ ข-3 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 3 PP/POE/

Nano-

CaCO₃/POE-G (95/0/5/5)

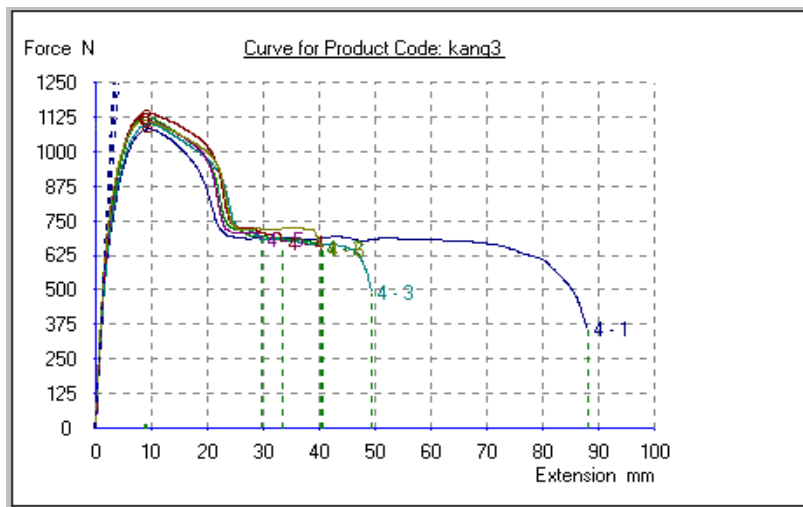
Batch	E.Modulus		Yield	Max Stress		Elong at Break	Thickness	Width
	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm		
3 - 1	856	27.57	27.57	137.0	3.000	12.80		
3 - 2	913	27.57	27.57	163.0	3.000	12.80		
3 - 3	887	27.18	27.18	148.0	3.000	12.80		
3 - 4	1021	27.02	27.02	138.0	3.000	12.80		
3 - 5	926	27.44	27.44	150.0	3.000	12.80		
3 - 6	1007	27.47	27.47	139.0	3.000	12.80		
3 - 7	1009	27.31	27.31	124.0	3.000	12.80		
3 - 8	1032	27.51	27.51	176.0	3.000	12.80		
n	8	8	8	8	8	8		
Mean	956.4	27.38	27.38	146.88	3.000	12.800		
Median		967	27.46	27.46	143.5	3.000	12.80	
Std. Dev.		68.514	0.1991	0.1991	16.392	0	0	
Range	176	0.55	0.55	52.0	0	0		
Maximum		1032	27.57	27.57	176.0	3.000	12.80	
Minimum		856	27.02	27.02	124.0	3.000	12.80	



รูปที่ ข-4 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 4 PP/POE/

Nano-CaCO₃ /POE-G (95/5/2.5/0)

Batch	E.Modulus		Yield	Max Stress		Elong at Break	Thickness	Width
	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm		
4 - 1	1056	30.44	30.44	63.8	3.000	12.80		
4 - 2	1033	30.27	30.27	59.4	3.000	12.80		
4 - 3	860	24.14	24.14	26.0	3.000	12.80		
4 - 4	1040	30.34	30.34	69.5	3.000	12.80		
4 - 5	1046	30.24	30.24	48.4	3.000	12.80		
4 - 6	1009	30.18	30.18	60.0	3.000	12.80		
4 - 7	1055	30.34	30.34	66.8	3.000	12.80		
4 - 8	1057	30.40	30.40	49.8	3.000	12.80		
n	8	8	8	8	8	8		
Mean	1019.4	29.54	29.54	55.47	3.000	12.800		
Median		1043	30.31	30.31	59.7	3.000	12.80	
Std. Dev.		66.330	2.1847	2.1847	14.055	0	0	
Range	197	6.30	6.30	43.5	0	0		
Maximum		1057	30.44	30.44	69.5	3.000	12.80	
Minimum		860	24.14	24.14	26.0	3.000	12.80	

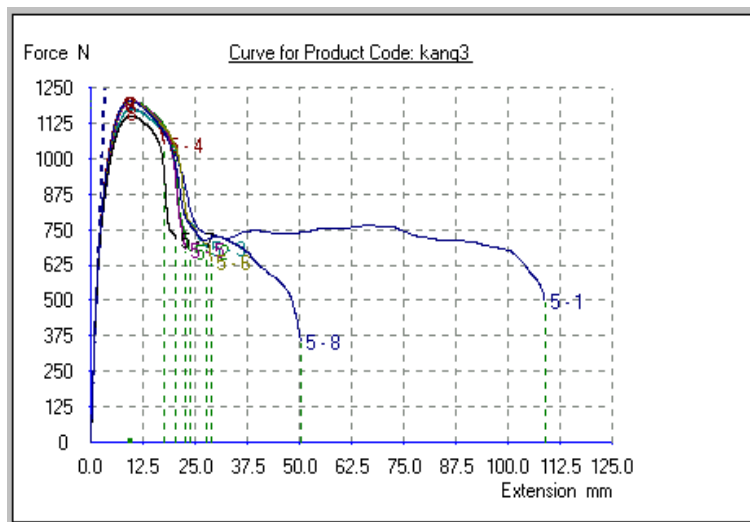


รูปที่ ข-5 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 5 PP/POE/

Nano-

CaCO₃ /POE-G (95/5/7/0)

Batch	Reference Width	E.Modulus		Yield	Max Stress	Elong at Break	Thickness
	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm	
5 - 1	802	28.13	28.13	88.00	3.000	12.80	
5 - 2	990	29.26	29.26	40.40	3.000	12.80	
5 - 3	907	28.61	28.61	49.42	3.000	12.80	
5 - 4	1015	29.62	29.62	33.40	3.000	12.80	
5 - 5	1081	29.00	29.00	29.68	3.000	12.80	
5 - 6	1089	28.94	28.94	40.50	3.000	12.80	
n	6	6	6	6	6	6	
Mean	980.7	28.93	28.93	46.90	3.000	12.800	
Median		1002	28.97	28.97	40.45	3.000	12.80
Std. Dev.		110.11	0.5186	0.5186	21.249	0	0
Range	288	1.50	1.50	58.32	0	0	
Maximum		1089	29.62	29.62	88.00	3.000	12.80
Minimum		802	28.13	28.13	29.68	3.000	12.80

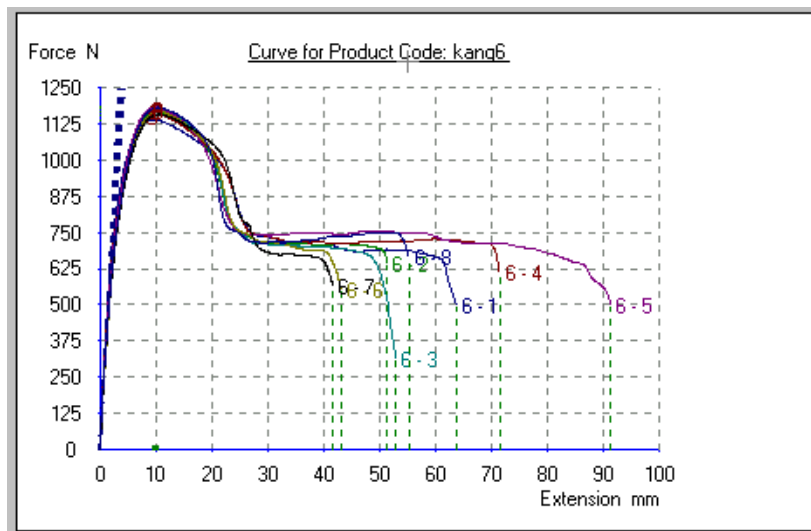


รูปที่ ข-6 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 6

PP/POE/

Nano-CaCO₃ /POE-G (95/5/2.5/1)

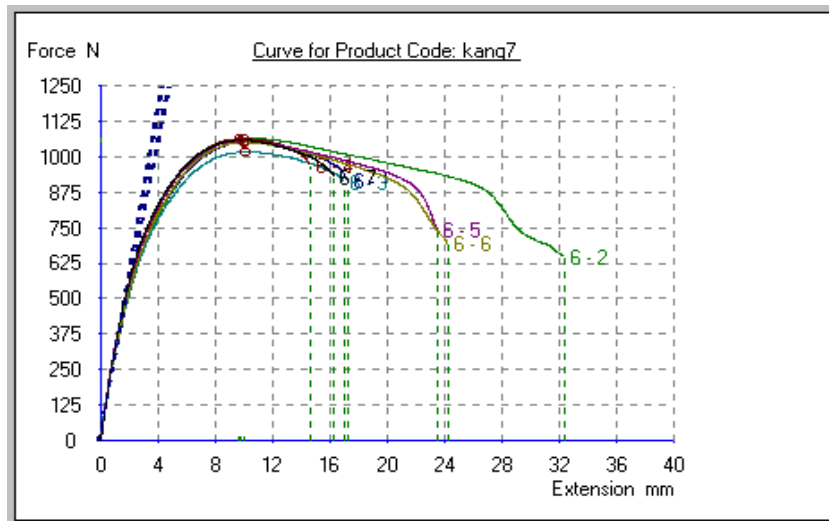
Batch	E.Modulus		Yield	Max Stress		Elong at Break	Thickness	Width
	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm		
6 - 1	969	30.63	30.63	108.88	3.000	12.80		
6 - 2	1015	31.35	31.35	23.90	3.000	12.80		
6 - 3	1036	30.57	30.57	27.92	3.000	12.80		
6 - 4	1074	31.35	31.35	17.60	3.000	12.80		
6 - 5	1026	31.32	31.32	22.80	3.000	12.80		
6 - 6	1075	31.28	31.28	29.00	3.000	12.80		
6 - 7	1051	29.95	29.95	20.50	3.000	12.80		
6 - 8	1085	31.32	31.32	50.40	3.000	12.80		
n	8	8	8	8	8	8		
Mean	1041.2	30.97	30.97	37.62	3.000	12.800		
Median		1043	31.30	31.30	25.91	3.000	12.80	
Std. Dev.		38.403	0.5269	0.5269	30.498	0	0	
Range	116	1.40	1.40	91.28	0	0		
Maximum		1085	31.35	31.35	108.88	3.000	12.80	
Minimum		969	29.95	29.95	17.60	3.000	12.80	



รูปที่ ข-7 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 7 PP/POE/

Nano-CaCO₃ /POE-G (95/5/2.5/3)

Batch	Reference Width	E.Modulus		Yield	Max Stress	Elong at Break	Thickness
	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm	
7 - 1	680	27.38	27.38	17.20	3.000	12.80	
7 - 2	684	27.73	27.73	32.32	3.000	12.80	
7 - 3	675	26.50	26.50	17.00	3.000	12.80	
7 - 4	742	27.70	27.70	14.60	3.000	12.80	
7 - 5	768	27.51	27.51	23.50	3.000	12.80	
7 - 6	702	27.34	27.34	24.20	3.000	12.80	
7 - 7	787	27.54	27.54	16.30	3.000	12.80	
n	7	7	7	7	7	7	
Mean	719.7	27.39	27.39	20.73	3.000	12.800	
Median		702	27.51	27.51	17.20	3.000	12.80
Std. Dev.		45.488	0.4184	0.4184	6.2931	0	0
Range	112	1.24	1.24	17.72	0	0	
Maximum		787	27.73	27.73	32.32	3.000	12.80
Minimum		675	26.50	26.50	14.60	3.000	12.80



รูปที่ ข-8 กราฟการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรที่ 8 PP/POE/

Nano-CaCO₃ /POE-G (95/5/2.5/5)

Batch	E.Modulus MPa	Yield MPa	Max Stress MPa	Elong at Break %	Thickness mm	Width mm
8 - 1	680	27.38	27.38	17.20	3.000	12.80
8 - 2	684	27.73	27.73	32.32	3.000	12.80
8 - 3	675	26.50	26.50	17.00	3.000	12.80
8 - 4	742	27.70	27.70	14.60	3.000	12.80
8 - 5	768	27.51	27.51	23.50	3.000	12.80
8 - 6	702	27.34	27.34	24.20	3.000	12.80
8 - 7	787	27.54	27.54	16.30	3.000	12.80
n	7	7	7	7	7	7
Mean	719.7	27.39	27.39	20.73	3.000	12.800
Median		702	27.51	27.51	17.20	3.000 12.80
Std. Dev.		45.488	0.4184	0.4184	6.2931	0 0
Range	112	1.24	1.24	17.72	0	0
Maximum		787	27.73	27.73	32.32	3.000 12.80
Minimum		675	26.50	26.50	14.60	3.000 12.80

ภาคผนวก ก

ภาพอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิต ในการขึ้นรูปชิ้นงานและใช้ในการทดสอบ
สมบัติทางการไหล และสมบัติเชิงกล



รูปที่ ค-1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruders)



รูปที่ ค-2 เครื่องฉีดพลาสติก (INJECTION MOLDING)



รูปที่ ค-3 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo



รูปที่ ค-4 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer (Shore D)



รูปที่ ค-5 แสดงภาพเครื่อง Universal testing machine



รูปที่ ค-6 เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index)



รูปที่ ค-7 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)