



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของอนุภาคสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความร้อน
ของฟิล์มเป่ารีดร่วมรีไซเคิลผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

Influence of Particle Fillers on Mechanical and Thermal Properties of
Recycled Co-Extruded Blown Films/High Density Polyethylene Blends

กัลยาณี ศรีวารินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประจำปี 2565

ชื่อโครงการวิจัย	อิทธิพลของอนุภาคสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความร้อนของฟิล์มเป่ารีดร่วมรีไซเคิลผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวกัลยาณี ศรีวารินทร์
สังกัด	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

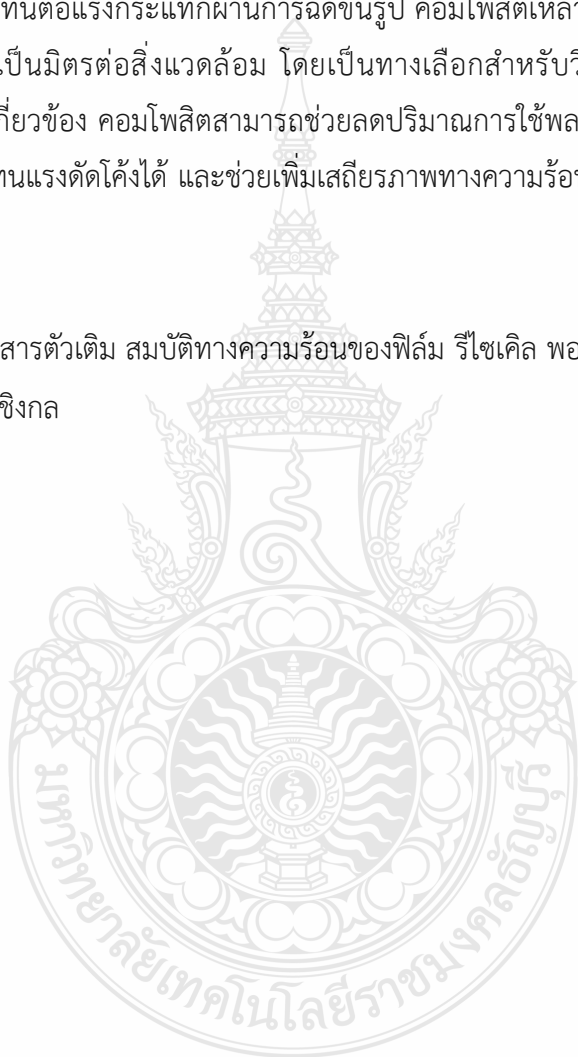
งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความร้อนของฟิล์มเป่ารีดร่วมรีไซเคิลผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลของฟิล์มรีดร่วม LDPE : LLDPE (RF) กับ HDPE และเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต โดยเติมสารตัวเติม 3 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โวลลาสโทไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ 2) ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่เตรียมได้

จากการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต แร่โวลลาสโทไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณสารตัวเติมต่าง ๆ คิดเป็นหน่วย % โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมอัดรีดแบบสกรูคู่ (Extruder Twin Screw) นำเม็ดพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผสมมาขึ้นรูปทดสอบด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) จากนั้นนำมาตรวจสอบสมบัติเชิงกล ความทนแรงกระแทก ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรง (Impact Tester) ความทนแรงดึงมอดูลัสความทนการโค้งงอด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Tester) สมบัติทางความร้อน มีการตรวจสอบอุณหภูมิอ่อนตัวภายใต้้้น้ำหนัก ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิการดัดงอจากความร้อน (Heat Distortion Temperature) การลามไฟด้วยตู้ทดสอบการติดไฟและลามไฟตามมาตรฐาน UL94 ทดสอบแนวตั้ง ดัชนีการไหลด้วยเครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Indexer)

ผลการวิจัยพบว่า 1) การเตรียมพอลิเมอร์ผสม (RF : HDPE) ทุกอัตราส่วนไม่มีการแตกหักที่สภาวะการทดสอบ มีความทนแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่ค่ามอดูลัสที่อัตราส่วน RF : HDPE เท่ากับ 70 : 30 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์มรีไซเคิลถึง 50.9 % จึงนำสูตรนี้ไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต และ 2) ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่าขึ้นทดสอบคอมโพสิตไม่เกิดการแตกหักที่สภาวะการทดสอบ การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตโวลลาสโทไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ในทุก ๆ อัตราส่วน ทำให้มีค่าความทนแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง แต่มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ค่าทนแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น สารตัวเติมทำให้ขึ้นทดสอบมีลามไฟช้าลง ค่าดัชนีการไหลและอุณหภูมิโค้งงอภายใต้้้น้ำหนักและน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตเหล่านี้ สามารถช่วยลดการใช้พลาสติกและปรับปรุงคุณสมบัติความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุ นอกจากนี้คอมโพสิตยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกอีกด้วย การศึกษานี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์และสารตัวเติมคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่มีสารตัวเติมสามประเภท แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้ออ่อนที่ทนต่อแรงกระแทกผ่านการฉีดขึ้นรูป คอมโพสิตเหล่านี้ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเป็นทางเลือกสำหรับวิศวกรออกแบบผลิตภัณฑ์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง คอมโพสิตสามารถช่วยลดปริมาณการใช้พลาสติก เพิ่มคุณสมบัติปรับปรุงความทนแรงดึงและทนแรงดัดโค้งได้ และช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติก

คำสำคัญ : อนุภาคนาโนตัวเติม สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม รีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
สมบัติเชิงกล



Research Title Influence of Particle Fillers on Mechanical and Thermal Properties of Recycled of Co-extruded Blown Films/High Density Polyethylene Blends

Name - Surname Kanlayanee Sriwarin

Affiliation Faculty of Engineering

Years 2022

Abstract

This study investigates the effects of filler particles on the mechanical and thermal properties of co - extruded blown films made from recycled high - density polyethylene (HDPE) blends. The purpose of this study is : (1) to prepare polymer blends from recycled pellets of co - extruded LDPE : LLDPE film with HDPE and to develop composite polymer blends by incorporating three types of filler particles : calcium carbonate, wollastonite, and montmorillonite; and (2) to investigate the mechanical and thermal properties of the obtained polymer blends and composite.

Polymer composites were prepared by incorporating varying amounts of calcium carbonate, wollastonite, and montmorillonite fillers, expressed as weight percentages, using a twin-screw extruder. The blended plastic pellets were molded using an Injection Molding Machine for testing. The molded samples were then evaluated for mechanical properties as follows : impact resistance using an Impact Tester; tensile strength, modulus, and flexural strength using a Universal Tester; thermal properties, including heat distortion temperature under load, using a Heat Distortion Temperature tester; flammability using a UL94 standard vertical burning test chamber; and melt flow index using a Melt Flow Indexer.

The research results found that : (1) polymer blends (RF : HDPE) prepared at all ratios did not exhibit fracture under the test conditions and showed similar tensile strength. However, the modulus at the RF : HDPE ratio of 70 : 30 by weight was 50.9% higher than that of the recycled film, so this formulation was selected for preparing polymer composites; and (2) mechanical testing of the polymer composites showed

that the composite samples did not fracture under the test conditions. The addition of calcium carbonate, wollastonite, and montmorillonite at all proportions caused a decrease in tensile strength and elongation at break but an increase in modulus. The flexural strength and flexural modulus also increased. The fillers slowed down the burning rate of the samples. The melt flow index and heat distortion temperature of the polymer composites slightly decreased compared to the polymer blends.

The research findings demonstrate that these polymer composites can reduce plastic consumption and improving the modulus, tensile strength, and flexural strength of the material. Additionally, the composites enhance the thermal stability of the plastic. This study provides valuable insights into the mechanical and thermal properties of polymer blends composed of polymers and fillers. Polymer composites containing three types of fillers demonstrate suitable performance for manufacturing impact-resistant soft products via injection molding. These composites enhance the value of recycled co-extruded films and are environmentally friendly, offering an alternative material option for product design engineers and related industries. The composites can help reduce plastic consumption, increase the modulus, improve tensile and flexural strength, and enhance the thermal stability of the plastic

Keyword : filler particles, thermal property of film, recycle, high-density polyethylene, mechanical property

กิตติกรรมประกาศ

วิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณา และความช่วยเหลือจากบุคลากร และองค์กรต่าง ๆ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนวยการ ลาภเกษมสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิจัย ที่ให้คำปรึกษาและแนวทางแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนสนับสนุนการทำวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ เพื่อให้วิจัยถูกต้องและกรรมการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและแก้ไขรูปเล่มวิจัย อาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องจักรสำหรับการเตรียมวัสดุ เชิงประกอบและการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชา ที่ให้ความช่วยเหลือการชี้แนะแนวทางในการปฏิบัติในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ โอกาสนี้ ที่มีส่วนทำให้วิจัยเล่มนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

กัลยาณี ศรีวารินทร์

ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	๗
กิตติกรรมประกาศ	๘
สารบัญ	๗
สารบัญตาราง	๘
สารบัญภาพ	๙
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย	6
2.1 พอลิเอทิลีน	6
2.2 การเป่าฟิล์ม	11
2.3 การรีไซเคิล	16
2.4 พอลิเมอร์ผสม	19
2.5 วัสดุคอมโพสิต	19
2.6 สารตัวเติม	21
2.7 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	42
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	42
3.2 วัสดุดิบและสารเคมี	44
3.3 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย	48
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	49
3.5 วิธีการทดลอง	50
3.6 วิธีการทดสอบ	53

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์	60
4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบจากฟิล์มรีไซเคิล (RF) HDPE และพอลิเมอร์ผสม	60
4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มรีไซเคิล (RF)HDPE และพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE	61
4.3 การเลือกสูตรพอลิเมอร์ผสมเพื่อเตรียมเป็นคอมโพสิต	66
4.4 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	67
4.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	69
4.6 อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน (HDT)	82
4.7 ดัชนีการหลอมไหล	85
4.8 สมบัติการลุกไหม้	87
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	90
5.1 ผลการศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพ	90
5.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	90
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนางาน	91
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก	99
ก การทดสอบสมบัติเชิงกล	100
ข การทดสอบสมบัติทางความร้อน	125
ค การทดสอบดัชนีการหลอมไหล	132
ประวัติผู้ทำวิจัย	135

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่ง PE โดยใช้ค่าความหนาแน่นเป็นเกณฑ์	7
2.2 สมบัติทั่วไปของงพอลิเอทิลีนประเภทต่าง ๆ	9
3.1 สมบัติของเม็ดพลาสติก HDPE (InnoPlus HD6200B)	45
3.2 สมบัติของ CaCO_3 (C6763)	45
3.3 สมบัติของแร่โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite XYNFW-SW)	46
3.4 อัตราส่วนการผสมเม็ดพลาสติกจากฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล (LDPE : LLDPE, RF) กับ HDPE	49
3.5 อัตราส่วนการผสมเม็ดพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE : Fillers	50
3.6 อุณหภูมิและสภาวะของการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	51
3.7 อุณหภูมิและสภาวะของการฉีดขึ้นทดสอบของเครื่องฉีดพลาสติก	52
4.1 ความทนแรงกระแทกของ RF HDPE และ พอลิเมอร์ผสม RF : HDPE	61
4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม (RF : HDPE) ที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต โวลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์	69
4.3 ความทนแรงดัดโค้ง ของพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF : HDPE : CaCO_3 , RF : HDPE : WLT และ RF : HDPE : MMT	78
4.4 อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF : HDPE : CaCO_3 , RF : HDPE : WLT และ RF : HDPE : MMT	82
4.5 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ	85
4.6 พฤติกรรมการลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF : HDPE : CaCO_3 , RF : HDPE : WLT และ RF : HDPE : MMT	87

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน	6
2.2 แบบจำลองสายโซ่โมเลกุลของ (ก) LDPE (ข) HDPE และ (ค) LLDPE	8
2.3 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown Film Extrusion)	11
2.4 เครื่องเป่าฟิล์มแบบหลายชั้น (Co-Extrusion Blown Film Process)	12
2.5 การผลิตฟิล์มหลายชั้น (ก) กระบวนการหล่อฟิล์มรีดร่วม (Co-Extrusion CastFilm Process) และ (ข) การแยกชั้นของพลาสติกระหว่างอยู่ใน Muti-Manifold Die	13
2.6 กระบวนการเคลือบรีดร่วม (Co-Extrusion Coating Process)	13
2.7 กระบวนการลามิเนตแบบเปียก	14
2.8 กระบวนการลามิเนตแบบแห้ง	15
2.9 การลามิเนตร้อน	15
2.10 การแบ่งประเภทของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้สารเสริมแรงหรือโครงสร้างเป็นเกณฑ์	20
2.11 SEM Of Ground Calcium Carbonate (GCC) SEM Of Precipitated Calcium Carbonate (PCC)	23
2.12 โพลลาสโตนต์ (ก) แร่โพลลาสโตนต์ที่พบในธรรมชาติ (ข) ผงโพลลาสโตนต์ และ (ค) ผลึกของโพลลาสโตนต์	24
2.13 แบบจำลองโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์	25
2.14 ลักษณะแรงกระทำ (ก) แรงดึง (ข) แรงอัด และ (ค) แรงเฉือน	26
2.15 ภาพแบบกราฟความเค้น-ความเครียด	27
2.16 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล	29
2.17 แผนภูมิวิธีการทดสอบความทนแรงกระทำ	30
2.18 การทดสอบความทนแรงกระทำ (ก) การทดสอบแบบไอซอด และ (ข) การทดสอบแบบชาร์ปี	31
2.19 การทดสอบความทนแรงดัดงอ (ก) การทดสอบการดัดงอแบบ 2 จุด และ (ข) การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด	31
2.20 เทอร์โมแกรมแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะการดูดกลืนและคายความร้อน	34
2.21 เครื่องวัดอุณหภูมิแอนตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

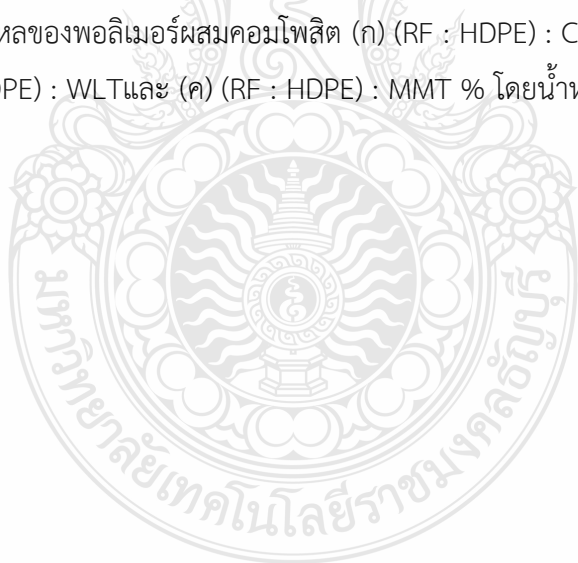
ภาพที่	หน้า
2.22 การวางขึ้นทดสอบอุณหภูมิแอ่นตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D648	35
2.23 ลักษณะห้วกทดสอบและการวางขึ้นทดสอบอุณหภูมิแอ่นตัวแบบไวแคทตามมาตรฐาน ASTM D1525	36
3.1 แผนภูมิแสดงวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเม็ดพลาสติกฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและการทดสอบสมบัติ	42
3.2 แผนภูมิแสดงวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตจากเม็ดพลาสติกฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล : พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง:สารตัวเติมและการทดสอบสมบัติ	43
3.3 เม็ดพลาสติกไซเคิลจากฟิล์มผสมรีดร่วม LDPE : LLDPE	44
3.4 เม็ดพลาสติก HDPE (InnoPlus HD6200B)	44
3.5 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃ C6763)	46
3.6 แร่วอลลาสโทไนต์ (Wollastonite XYNFW-SW)	47
3.7 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	47
3.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว (CTE - D02L800)	51
3.9 เม็ดพอลิเมอร์ผสมจากฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล (LDPE : LLDPE) : HDPE	51
3.10 เครื่องฉีดพลาสติก Arburg Allrounder 470 C	52
3.11 ขึ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี	53
3.12 การทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี (ก) เครื่องบากชิ้นงาน (Ceast) (ข) เครื่องทดสอบความทนแรง (Ceast)	54
3.13 ขึ้นทดสอบความทนแรงดึงรูปดัมเบลล์	54
3.14 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์เซล (Hounsfield H 50 KS)	55
3.15 ชิ้นงานทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D648	56
3.16 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการดัดงอจากความร้อน (Heat Distortion Temperature, HDT) CEAST 6911	56
3.17 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (MFI)	57
3.18 ตู้ทดสอบการติดไฟและลามไฟตามมาตรฐาน UL94 ทดสอบแนวตั้ง	58
3.19 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบการติดไฟและลามไฟ	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.20	ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบความทนแรงดัด
4.1	ขั้นตอนทดสอบ (ก) พิล์มรีไซเคิล (RF) (ข) HDPE (ค) RF : HDPE 90 : 10 (ง) RF : HDPE 80 : 20 และ (จ) RF : HDPE 70 : 30
4.2	ขั้นตอนทดสอบความทนแรงกระแทกของฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิล : พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
4.3	ความทนแรงกระแทกของฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ ผสมฟิล์มรีไซเคิล : พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
4.4	ความทนแรงดึงของฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสม ฟิล์มรีไซเคิล : พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
4.5	ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
4.6	ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มรีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
4.7	ขั้นตอนทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) HDPE (ข) RF : HDPE (ค) (RF : HDPE) : CaCO ₃ 90 : 10 (ง) (RF : HDPE) : CaCO ₃ 80 : 20 และ (จ) (RF : HDPE) : CaCO ₃ 70 : 30 % โดยน้ำหนัก
4.8	ขั้นตอนทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) HDPE (ข) RF : HDPE (ค) (RF : HDPE):WLT 90 : 10 (ง) (RF : HDPE) : WLT 80 : 20 และ (จ) (RF : HDPE) : WLT 70 : 30 % โดยน้ำหนัก
4.9	ขั้นตอนทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) HDPE (ข) RF : HDPE (ค) (RF : HDPE) : MMT 90 : 10 (ง) (RF : HDPE) : MMT 80 : 20 และ (จ) (RF : HDPE) : MMT 70 : 30 % โดยน้ำหนัก
4.10	ขั้นตอนทดสอบความทนแรงกระแทกของฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต
4.11	ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF : HDPE) : CaCO ₃ (ข) (RF : HDPE) : WLT และ (ค) (RF : HDPE) : MMT % โดยน้ำหนัก

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 ค่ายังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF : HDPE) : CaCO_3 (ข) (RF : HDPE) : WLT และ (ค) (RF : HDPE) : MMT % โดยน้ำหนัก	75
4.13 ร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF : HDPE) : CaCO_3 (ข) (RF : HDPE) : WLT และ (ค) (RF : HDPE) : MMT % โดยน้ำหนัก	77
4.14 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF : HDPE) : CaCO_3 (ข) (RF : HDPE) : WLT และ (ค) (RF : HDPE) : MMT % โดยน้ำหนัก	79
4.15 มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF : HDPE) : CaCO_3 (ข) (RF : HDPE) : WLT และ (ค) (RF : HDPE) : MMT % โดยน้ำหนัก	81
4.16 อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF : HDPE) : CaCO_3 (ข) (RF : HDPE) : WLT และ (ค) (RF : HDPE) : MMT % โดยน้ำหนัก	84
4.17 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF : HDPE) : CaCO_3 (ข) (RF : HDPE) : WLT และ (ค) (RF : HDPE) : MMT % โดยน้ำหนัก	86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มีภาควิชาต่าง ๆ รวมทั้งหมด 10 ภาควิชา ดังนี้ 1. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา 2. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า 3. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล 4. ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ 5. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ 6. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ 7. ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม 8. ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ 9. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และ 10. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มียุทธศาสตร์ เพื่อการพัฒนาการวิจัยเพื่อสร้างสรรค์นวัตกรรม Research For Innovation และปณิธาน “มุ่งมั่น ผลิตวิศวกรนักปฏิบัติสร้างงานวิจัยละนวัตกรรมที่เพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ร่วมกับ ภาควิชาอุตสาหกรรมและชุมชน” [1]

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบ ผลิตบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ (Bachelor Of Engineering Program In Engineering) แบ่งออกเป็น 2 แขนง ประกอบด้วย 1) วิศวกรรมอุตสาหการพลาสติก (Plastics Engineering) 2) วิศวกรรมพอลิเมอร์ (Polymers Engineering) จำนวนหน่วยกิตที่เรียนตลอดหลักสูตร 148 หน่วย [2] และวิชาที่เป็นพื้นฐานของแขนงวิชาทั้ง 2 แขนง มีหลายรายวิชาที่ลงปฏิบัติการ ไม่ว่าจะเป็นปฏิบัติการเคมี กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ไปจนถึงการขึ้นรูปพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของเสียหลากหลายชนิดหลังจากการทำปฏิบัติการเสร็จ ผู้วิจัยซึ่งมีภาระงาน ในการจัดเก็บของเสียสารเคมีและของเสียที่เกิดจากการลงปฏิบัติการเมื่อนักศึกษาฝึกปฏิบัติการจาก ชั่วโมงเรียน ซึ่งในส่วนของเสียที่เกิดจากปฏิบัติการเคมี ก็จะมีการแยกและเขียนป้ายรอบริษัทนำไป กำจัด ส่วนที่เป็นพลาสติกจากการเรียนปฏิบัติการขึ้นรูป เมื่อนักศึกษาฝึกทักษะในชั่วโมงเรียนแล้ว ชิ้นงานส่วนใหญ่มีการนำมารีไซเคิล และนักศึกษาเป็นผู้รีไซเคิลเอง ซึ่งจะเป็นขวดจากกระบวนการ เป่าแก้วพลาสติกจากขบวนการฉีด โดยมีวัตถุประสงค์คือเป็นการฝึกทักษะการรีไซเคิลและ ปลุกฝังจิตสำนึกในการช่วยลดปัญหาขยะพลาสติก โดยการนำมาบดและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ลดขยะ และช่วยลดการใช้วัสดุฝึกของภาควิชาได้บางส่วน แต่ในทางปฏิบัติจะมีอีกขบวนการคือ การเป่าฟิล์ม ซึ่งหลังจากที่นักศึกษาลงปฏิบัติการเสร็จก็จะได้ เป็นถุงพลาสติก ซึ่งยากต่อการรีไซเคิล และเม็ดพลาสติกที่ให้นักศึกษาฝึกภาคปฏิบัติพื้นฐานที่ใช้ส่วนใหญ่ คือ พลาสติกกลุ่มพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงใส่ถุงรวมกันกับพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น นักศึกษาบางคนเข้าใจว่าเป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนเหมือนกันจึงใส่

รวมกันได้ ซึ่งเมื่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบและทดสอบสมบัติพบว่า มีความแตกต่างจากชิ้นงานที่นักศึกษาเตรียมได้ในชั่วโมงเรียน ซึ่งอาจส่งผลทำให้นักศึกษาเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าเป็นผลมาจากการรีไซเคิล และในปฏิบัติการที่ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม (Fillers) ในระหว่างทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า นักศึกษาหลายรายยังไม่สามารถอธิบายลักษณะอนุภาคของสารตัวเติมที่ต่างกัน ว่ามีผลต่อสมบัติของขึ้นทดสอบอย่างไร ซึ่งภาควิชามีการสอนรายวิชา 04722206 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (Polymerization Processing) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิชาที่นักศึกษาสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ต้องเรียนรู้ และฝึกทักษะ มีเนื้อหาวิชาโดยสรุป สอนเกี่ยวกับกระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ขึ้นรูปพอลิเมอร์ - พลาสติกและมีภาคปฏิบัติเพื่อฝึกทักษะ โดยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน จลศาสตร์ และการควบคุมปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน กระบวนการผลิตและสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ทางอุตสาหกรรม ตัวเร่งปฏิกิริยาและเครื่องปฏิกรณ์ ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ การทำให้พอลิเมอร์บริสุทธิ์ ลักษณะของพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แบบต่าง ๆ และการปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องและนำมาทดสอบสมบัติ ทำให้นักศึกษาสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน และแก้ไขปัญหาในการผลิตจริงได้ และมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนารายวิชา คือ การนำงานวิจัยทางด้านพอลิเมอร์เข้ามาสอดแทรกในเนื้อหาวิชา

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยซึ่งมีภาระงานในการสนับสนุนการเรียนการสอน เกี่ยวข้องกับการใช้ห้องปฏิบัติการโดยตรง ในรายวิชา 04722206 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (Polymerization Processing) จึงต้องการที่จะศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับ การนำพอลิเมอร์มาทดสอบสมบัติศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งผลการวิจัยสามารถช่วยลดปริมาณการใช้พลาสติกและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเม็ดพลาสติกใหม่ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการเพิ่มมูลค่าของพลาสติกได้ ช่วยปรับปรุงสมบัติ ความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้งได้ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติพลาสติกให้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น จะเป็นประโยชน์ต่อการเรียนรู้ของนักศึกษาในรายวิชาดังกล่าว เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน โดยสามารถใช้ผลในการทดลองนี้ ไปใช้ในรายวิชาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนช่วยมากในการออกแบบ เลือกรูปร่าง และประเมินผลของการสังเคราะห์พอลิเมอร์เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานจริง เช่น ก่อนสังเคราะห์ กำหนดเป้าหมายว่าต้องการพอลิเมอร์ที่ “แข็ง, เหนียว, ยืดหยุ่น, ทนร้อน, ทนเย็น” แค่นั้น ระหว่างสังเคราะห์ ใช้สมบัติเหล่านี้เป็นเกณฑ์ทดสอบเพื่อปรับสภาวะ (ชนิดโมโนเมอร์, ตัวเร่ง, อุณหภูมิ, เวลา) หลังสังเคราะห์ใช้ทดสอบสมบัติ (Tensile test, DMA, DSC, TGA) เพื่อยืนยันว่าได้พอลิเมอร์ตามที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิล (RF) ของฟิล์มรีดร่วม LDPE : LLDPE กับ HDPE และเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต โดยเติมสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โพลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ลดปริมาณขยะของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ เพิ่มมูลค่าของฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลที่เหลือจากการลงปฏิบัติการขึ้นรูปพลาสติก

1.3.2 ได้วัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีสมรรถนะเหมาะสมสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์อ่อนช่วยลดปริมาณการใช้พลาสติกและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเม็ดพลาสติกใหม่ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.3.2 ทราบถึงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมกับสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โพลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์

1.3.3 เป็นทางเลือกสำหรับวิศวกรออกแบบผลิตภัณฑ์และในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้วัสดุ

1.3.4 นำความรู้ที่ได้จากการวิจัยไปถ่ายทอดให้กับนักศึกษาในการเรียนการสอนในรายวิชา (04722206) กระบวนการสังเคราะห์ พอลิเมอร์ (Polymerization Processing) ซึ่งสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนช่วยมากในการออกแบบ เลือกวิธี และประเมินผล ของการสังเคราะห์พอลิเมอร์เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานจริง

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากฟิล์มรีดร่วม 2 ชั้น (LDPE : LLDPE) เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สารตัวเติมอนินทรีย์แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โพลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์

1.4.2 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม เตรียมโดยนำเม็ดพลาสติกรีไซเคิล (RF) จาก(LDPE : LLDPE) และเม็ดพลาสติก HDPE มาผสมกันด้วยเทคนิคการหลอมผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยมีในอัตราส่วนของเม็ดพลาสติก HDPE เท่ากับ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก แล้วรีดออกมาเป็นเส้นพลาสติกทำการระบายความร้อนด้วยการดึงผ่านน้ำ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการตัดเม็ดใหม่ เพื่อให้ได้เม็ดพอลิเมอร์ผสมรูปทรงกระบอก ใกล้เคียงความชื้นและขึ้นรูป

ขั้นตอนทดสอบด้วยการฉีดในแบบ ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง มอดุลัสแรงดึง และ % การยืดตัว จากนั้นเลือกสูตรที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าความทนแรงกระแทก และมอดุลัสแรงดึงเป็นหลัก เพื่อนำไปเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตต่อไป

1.4.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต เตรียมโดยการนำพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติเหมาะสม มาใส่สารตัวเติมอนินทรีย์แต่ละชนิด โดยมีอัตราส่วนของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสม เท่ากับ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนักและใช้วิธีการผสมการขึ้นรูปเช่นเดียวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสม จากนั้นทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี ที่มีรอยบาก ตามมาตรฐาน ASTM D6110
- 2) ทดสอบความทนแรงดึง มอดุลัส ร้อยละการยืดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D638
- 3) ทดสอบความทนแรงดัดโค้ง มอดุลัสแรงดัดโค้ง ตามมาตรฐาน ASTM D790
- 4) ทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D648
- 5) ทดสอบดัชนีการหลอมไหล ตามมาตรฐาน ASTM D1238
- 6) ทดสอบการติดไฟและลามไฟตามมาตรฐาน UL94

1.3.4 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย ระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2565 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2566

1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ

1.5.1 อิทธิพลของอนุภาคสารตัวเติม หมายถึง สารตัวเติมที่มีขนาดเล็กส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ของฟิล์มเป่ารีดร่วมรีไซเคิลผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

1.5.2 สารตัวเติม หมายถึง สารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่วอลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ สารที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่ผสมในพอลิเมอร์ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเชิงกลให้ดีขึ้น ช่วยในกระบวนการผลิต หรือเป็นการลดต้นทุนและอายุการใช้งาน

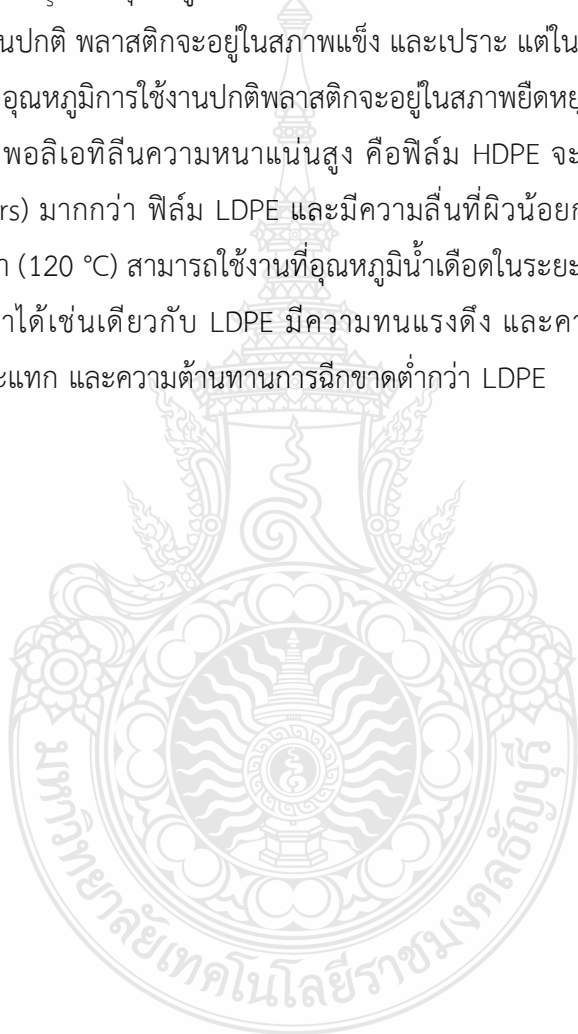
1.5.3 สมบัติเชิงกล เป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากในงานวิศวกรรม โดยทั่วไปสมบัติชนิดนี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการตัดสินใจเลือกใช้ชนิดพลาสติก สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงกระทำของพลาสติก กล่าวคือเมื่อพลาสติกได้รับแรงกระทำจากภายนอก จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ในที่สุด ดังนั้น สมบัติเชิงกลจึงเป็นตัวที่บ่งชี้พฤติกรรมของพลาสติกภายใต้แรงหรือน้ำหนักที่มากระทำพฤติกรรม การตอบสนองแรงที่มากระทำนั้นจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้าง การจัดเรียงโมเลกุลและจุดบกพร่องภายในโมเลกุลของพลาสติก

1.5.4 สมบัติทางความร้อน ความหมายโดยทั่วไป หมายถึงการตอบสนองของวัสดุที่มีต่อความร้อน เช่น การที่วัสดุสามารถดูดซับพลังงานในรูปของความร้อน และเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การหลอม การเปลี่ยนแปลงขนาดหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อน เป็นต้น

อุณหภูมิการหลอมตัว (T_m) เป็นอุณหภูมิที่พลาสติกเกิดการหลอมเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นของไหล

อุณหภูมิแก้ว (T_g) เป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกถึงสภาพการใช้งาน เช่น ถ้าพลาสติกมีอุณหภูมิแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานปกติ พลาสติกจะอยู่ในสภาพแข็ง และเปราะ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าพลาสติกมีอุณหภูมิแก้วสูงกว่าอุณหภูมิการใช้งานปกติพลาสติกจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่นเหนียว

1.5.5 फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง คือฟิล์ม HDPE จะมีความแข็งตึง (Stiffness) ความแข็ง (Hardness) มากกว่า ฟิล์ม LDPE และมีความลื่นที่ผิวน้อยกว่าฟิล์ม LDPE นอกจากนี้ยังมีจุดอ่อนตัวสูงกว่า ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$) สามารถใช้งานที่อุณหภูมิน้ำเดือดในระยะเวลาสั้น ๆ ได้ และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้เช่นเดียวกับ LDPE มีความทนแรงดึง และความทนแรงดันทะลุสูงกว่า แต่มีความทนแรงกระแทก และความต้านทานการฉีกขาดต่ำกว่า LDPE



บทที่ 2

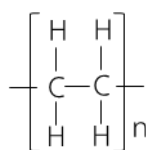
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องอิทธิพลของอนุภาคสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความร้อนของฟิล์มเป่ารีดร่วมรีไซเคิลผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้า แนวคิด ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการศึกษาในงานวิจัยดังต่อไปนี้

- 2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)
- 2.2 การเป่าฟิล์ม (Blown Film Extrusion)
- 2.3 การรีไซเคิล (Recycling)
- 2.4 พอลิเมอร์ผสม (Mixed polymer)
- 2.5 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials)
- 2.6 สารตัวเติม (Fillers)
- 2.7 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน
- 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [3]

พอลิเอทิลีนหรือ PE ผลิตขึ้นในทางการค้าเป็นครั้งแรกเป็นพอลิเอทิลีนแบบกิ่งสาขา มีความหนาแน่นต่ำ คือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) แต่ปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) และการทำโคพอลิเมอร์ จึงทำให้พอลิเอทิลีนมีโครงสร้างหลายรูปแบบแตกต่างกันส่งผลให้มีสมบัติที่ต่างกัน พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุด เตรียมได้จากการพอลิเมอร์ไรส์แก๊สเอทิลีน จนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีรูปแบบโครงสร้างโมเลกุล 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบเชิงเส้น (Linear) และโครงสร้างแบบกิ่งสาขา (Branched) มีโครงสร้างทางเคมีแสดงตามภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [3]

PE เป็นพลาสติกกึ่งผลึก ดังนั้นการที่มีกิ่งสาขาในโครงสร้างสายโซ่มากจะลดความสามารถในการเกิดผลึกซึ่งมีผลไปถึงความหนาแน่นและสมบัติอื่นๆ จึงทำให้ PE มีสมบัติแตกต่างกัน โดย PE ที่มีกิ่งก้านสาขามากจะมีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว ความแข็งตึง ความแข็งของพื้นผิว (Surface Hardness) และจุดอ่อนตัว (Softening Point) ต่ำ แต่จะยอมให้แก๊สหรือไอน้ำซึมผ่านได้ง่าย ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นกับการมีกิ่งสาขาของโมเลกุล แต่สมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ยังต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย ถึงแม้ว่าปัจจุบันพอลิเอทิลีนที่เตรียมได้จะมีหลายชนิด แต่สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีบทบาทในการใช้งานมีเพียงไม่กี่ชนิด คือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE)

2.1.1 การแบ่งประเภทพอลิเอทิลีน [3]

พอลิเอทิลีนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการต่าง ๆ จะมีความหนาแน่นแตกต่างกัน มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลและกิ่งสาขาแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้มีสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 แสดงการแบ่งพอลิเอทิลีนโดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง

ตารางที่ 2.1 การแบ่ง PE โดยใช้ค่าความหนาแน่นเป็นเกณฑ์

Polyethylene	Type	Density, g/cm ₃
HDPE (High Density Polyethylene)	Homopolymer	0.941 - 0.965
MDPE (Medium Density Polyethylene)	Homopolymer	0.926 - 0.940
LDPE (Low Density Polyethylene)	Homopolymer	0.910 - 0.925
LLDPE (Linear Low Density Polyethylene)	Copolymer	0.925 - 0.940
VLDPE (Very Low Density Polyethylene)	Copolymer	< 0.910

2.1.2 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีน [3]

PE เป็นพลาสติกที่มีลักษณะยืดหยุ่นอ่อนตัว ทั้งนี้เป็นผลมาจากสภาพการยืดหยุ่นของพันธะ C-C ในสายโซ่โมเลกุล ทำให้ PE มี T_g ค่อนข้างต่ำขึ้นกับปริมาณของผลึกโดยมี T_g ตั้งแต่ประมาณ -130 ถึง 60 °C ซึ่งจะมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้น PE จึงมีทั้งสภาพยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติ PE เป็นพลาสติกที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก (Excellent) เพราะเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว สมบัติต่าง ๆ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และเฟาเวอร์แฟกเตอร์ (Power Factor) จึงไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ แต่บางครั้งอาจพบว่ามีค่าคงที่

ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติทางเคมี PE จัดเป็นพาราฟิน (Parafin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อย เพราะไม่มีแรงดึงดูดพิเศษ เช่น พันธะไฮโดรเจนกับตัวทำละลายและเนื่องจากความเป็นผลึกที่สูงจึงทำให้ PE ไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 70°C PE จะเริ่มบวมตัวและละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนหรือฮาโลเจนไฮโดรคาร์บอน เช่น โทลูอิน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีนและไดคลอโรเอทิลีน เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ละลาย PE จะสูงขึ้นเมื่อความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง $60 - 80^{\circ}\text{C}$ ของเหลวบางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ เอสเตอร์ และคีโตน อาจทำให้ PE เกิด “Environmental Stress Cracking” (ESC) ถ้าได้รับความเค้นขณะที่แช่อยู่ในของเหลวเหล่านั้น ทำให้เกิดการแตกหักได้ที่ความเค้นต่ำกว่าเมื่อไม่มีของเหลว นอกจากนี้ PE สามารถทนกรดและด่างได้ดี ใช้ทำภาชนะบรรจุกรด และด่างหรือสารออกซิไดซ์แรง ๆ ได้ ข้อเสียของ PE คือมีสภาพผิวค่อนข้างมันคล้ายมีไข และเฉื่อยต่อการเกิดพันธะทางเคมีจึงเป็นอุปสรรคต่อการพิมพ์ และตกแต่ง จำเป็นต้องเตรียมผิวเพื่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิว เพื่อเป็นการเตรียมผิวให้มีข้อสามารถรับหมึกพิมพ์ได้ดี ภาพที่ 2.2 แสดงแบบจำลองลักษณะสายโซ่โมเลกุล และตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทั่วไปของ LDPE HDPE และ LLDPE



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองสายโซ่โมเลกุลของ (ก) LDPE (ข) HDPE และ (ค) LLDPE [4]

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนประเภทต่าง ๆ

Properties	LDPE	HDPE	LLDPE
Density (g/cm ³)	0.92	0.96	0.94
Tm (°C)	108	133	123
Tensile Strength (MPa)	10	28	10
Elongation At Break (%)	450	500	700
Hardness (Shore D)	45	65	55
Vicat Softening Point (0 °C)	95	120	-

ปัจจุบันพอลิเอทิลีนมีเกรดให้เลือกใช้งานมากมาย แต่ละเกรดมีจุดเด่นด้านสมบัติที่แตกต่างกัน ความแตกต่างเหล่านี้เกิดขึ้นจากปัจจัยหลัก ๆ คือ ความยาวและจำนวนกิ่งสาขาในพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล การใส่มอนอเมอร์ต่างชนิดกันเพื่อเตรียมโคพอลิเมอร์ปริมาณและชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ปรับปรุงสมบัติ แต่อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนก็มีจุดอ่อนที่ส่งผลต่อการใช้งานผลิตภัณฑ์ คือมีจุดอ่อนตัวต่ำ ทำให้ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เมื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่หนาจะมีความทึบแสง มีลักษณะผิวมันลื่น มีความต้านทานการการเกิดรอยขีดข่วนต่ำ และยอมให้แก๊สบางชนิดผ่านได้ [4]

2.1.3 พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [5]

ฟิล์ม LDPE ถูกใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์มากที่สุด ใช้ทำถุงเย็นฟิล์มหด (Shrink Film) และฟิล์มยืด (Stretch Film) โดยมีความเป็นผลึก 55 - 70 % เนื่องจากการที่โมเลกุลมีสายโซ่กิ่งยาวสายโซ่โมเลกุลไม่สามารถอยู่ใกล้กัน และจัดเรียงโมเลกุลผลึกสูง ๆ ได้ ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนจะเคลื่อนไหวและไหลได้ง่าย สมบัติของฟิล์มชนิดนี้คือมีความเหนียว โปร่งแสง ความอ่อนนุ่ม ความยืดหยุ่น และยืดตัวได้มากกว่า HDPE มีสมบัติต่าง ๆ เช่น ความทนแรงดึง (Tensile Strength), ความทนแรงดันทะลุ (Burst Strength), ความทนแรงกระแทก (Impact Strength) และความทนการฉีกขาด (Tear Strength) ดีพอสมควรสามารถกักกั้นน้ำและไอน้ำได้ดี แต่สกักกั้นแก๊สไม่ดีนัก สามารถปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย จุดอ่อนตัว (Softening Point) ของ LDPE ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำเล็กน้อย ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้งานเมื่อมีน้ำเดือดหรือการสเตอริไลซ์ด้วยไอน้ำ (Steam Sterilization) ได้ ฟิล์ม LDPE มีความต้านทานสารเคมี เช่น กรด และด่างทั่ว ๆ ไป และสารละลายอินทรีย์ได้ดีมาก แต่ไม่ทนต่อสารไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน และไขมัน (Grease) สารซักล้าง (Detergents) น้ำมันหอมระเหย (Essential Oils) บางชนิด

นอกจากนี้ พิล์ม LDPE มีสมบัติดูดฝุ่นในอากาศมาเกาะติดตามผิว ทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจาก LDPE เมื่อทิ้งไว้นาน ๆ จะเปราะด้วยฝุ่น พิล์ม LDPE ไม่มีกลิ่นไม่มีรส จึงใช้อย่างกว้างขวางในการบรรจุอาหาร สามารถปิดผนึกด้วยความร้อน (Heat Sealed) ได้ง่าย และให้ตะเข็บหรือรอยเชื่อม (Seam) ที่แข็งแรง

2.1.4 พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง [6]

พิล์ม HDPE จะมีความแข็งตึง (Stiffer) ความแข็ง (Harder) มากกว่าพิล์ม LDPE และมีความลื่นที่ผิวน้อยกว่าพิล์ม LDPE นอกจากนี้ยังมีจุดอ่อนตัวสูงกว่า (120°C) สามารถใช้งานที่อุณหภูมิน้ำเดือดในระยะเวลาดสั้น ๆ ได้ และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้เช่นเดียวกับ LDPE มีความทนแรงดึง และความทนแรงด้นทะลุสูงกว่า แต่มีความทนแรงกระแทก และความต้านทานการฉีกขาดต่ำกว่า LDPE เนื่องจากโมเลกุลของ HDPE เป็นแบบเชิงเส้นจึงมีการจัดเรียงตัวในทิศทางของการไหล ดังนั้นชิ้นงานในแนวตามเครื่องจักร (Machine Direction, MD) จะมีความต้านทานการฉีกขาดต่ำกว่าในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction, TD) มาก สภาพการซึมผ่านได้ (Permeability) ของ HDPE ต่ำกว่า LDPE ดังนั้นจึงสามารถสกัดกั้นไอน้ำได้ดีกว่า LDPE ความต้านทานสารเคมีของ HDPE สูงกว่า LDPE รวมทั้งมีความต้านทานน้ำมันและไขมันได้ดีกว่า

2.1.5 พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [6]

โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของ LLDPE จะแตกต่างจาก LDPE มาก กล่าวคือ LLDPE ไม่มีสายโซ่กิ่งยาว (ภาพที่ 2.2 ค) และความหนาแน่นจะถูกควบคุมด้วยการเติมโคโมโนเมอร์ (Comonomer) เช่น บิวทีน (Butene), เฮกซีน (Hexene) หรือออกทีน (Octene) เข้าไปในแก๊สเอทิลีนระหว่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งโคโมโนเมอร์เหล่านี้ทำให้เกิดสายโซ่กิ่งสั้น (Short - Chain Branch) ความยาวต่างกัน สมบัติของพิล์ม LLDPE ขึ้นกับชนิด และปริมาณโคโมโนเมอร์ที่ใช้ ซึ่ง Octene - Based LLDPE จะมีสมบัติดีกว่า และราคาแพงกว่า Hexene - Based LLDPE และ Hexene - Based LLDPE ดีกว่า Butene - Based LLDPE โดยทั่วไป LLDPE จะมีความเหนียวสูงกว่า และทำพิล์มได้บางกว่า การผลิตพิล์มใช้ความดันและอุณหภูมิต่ำกว่า LDPE แต่ใช้อุณหภูมิในการพ่นด้วยความร้อนสูงกว่า LDPE เพราะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า และช่วงอุณหภูมิการพ่นด้วยความร้อนแคบกว่า นอกจากนี้ยังมี ESCR มากกว่า LDPE จุดอ่อนของ LLDPE คือ ช่นกว่า LDPE

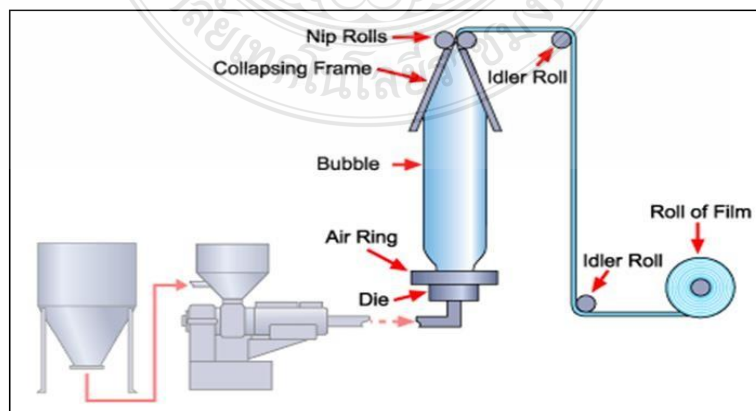
2.1.6 การเปรียบเทียบสมบัติของพิล์มโอเลฟินส์ [7]

เนื่องจากสมบัติเด่นของ LDPE และ LLDPE ในการผลิตพิล์มบาง จึงนิยมผสมเม็ดพลาสติกทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกัน โดยใช้ LDPE และ LLDPE ในอัตราร้อยละ 50/50 ดังนั้นพิล์มกลุ่มโอเลฟินส์ที่มีปริมาณการใช้งานในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์สูงในปัจจุบันจะมีพิล์ม HDPE พิล์ม LDPE พิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/LLDPE และพิล์ม PP (Polypropylene) ซึ่งพิล์มชนิดพอลิโอเลฟินส์

เหล่านี้มีสมบัติหลายอย่างคล้ายกัน แต่มีสมบัติที่สำคัญบางอย่างแตกต่างกันการที่ HDPE มีความหนาแน่นมากกว่าจึงมีความทนแรงดึงและความแข็งดึงสูงกว่า และมี Water Transmission Rate (WVTR) ต่ำกว่า LDPE หรือพอลิเมอร์ผสม LDPE/LLDPE ส่วนฟิล์ม PP จะมีความทนแรงดึงสูงกว่า HDPE เพราะมีระดับความเป็นผลึก (Degree Of Crystallinity) สูงกว่า และสามารถจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (Biaxial Orientation) ได้ นอกจากนี้ฟิล์ม PP ยังมีสมบัติทางแสงคือมีความใสกว่า เพราะมีโครงสร้างผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก และมีการจัดเรียงตัว 2 ทิศทางแต่การที่ LDPE หรือฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/LDPE Blends มีความใสมากกว่า เนื่องจากมีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่าในบรรดาพอลิโเอเลฟินส์ทั้ง 3 ชนิด HDPE จะทึบแสงที่สุด ซึ่งเป็นข้อดีในกรณีที่ต้องการความทึบแสง เพราะจะใช้ผงสี (Pigment) ปริมาณน้อยกว่าเพื่อให้มีความทึบแสงตามต้องการฟิล์ม LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/LDPE เมื่อถูกดึงจะยืดตัวได้มากกว่าและมีมอดุลัสต่ำกว่า เพราะมีความเป็นผลึกต่ำกว่า ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ในการทำฟิล์มหดรหรือฟิล์มยืด แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ทำถุงหิ้ว

2.2 การเป่าฟิล์ม (Blown Film Extrusion) [8]

การเป่าฟิล์มเป็นเทคโนโลยีการผลิตฟิล์มที่ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ กระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติกโดยการเป่า ทำได้โดยนำเม็ดพลาสติกหลอมในเครื่องอัดรีด จากนั้นรีดพลาสติกผ่านดายน์ออกมาคล้ายท่อกลวงแล้วจึงปล่อยลมเข้าไปในท่อพลาสติกเหล่านี้ให้พองตัวในอากาศ และรีดออกมาเป็นถุงฟิล์มพลาสติก หรือแผ่นพลาสติกบาง โดยในขั้นตอนการทำแผ่นพลาสติกบาง จะต้องผ่านขั้นตอนการตัดขอบทั้งสองข้างของถุงพลาสติก การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกด้วยกระบวนการนี้สามารถใช้ได้กับพลาสติกหลายชนิด แต่โดยทั่วไปนิยมใช้ ในการผลิตฟิล์มพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน (HDPE LDPE และ LLDPE)



ภาพที่ 2.3 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown Film Extrusion) [8]

นอกจากเป่าฟิล์มชนิดชั้นเดียวตามภาพที่ 2.3 แล้วยังมีการผลิตฟิล์มหลายชั้นเพื่อเป็นการปรับปรุง หรือเพิ่มสมรรถนะการใช้งานฟิล์ม และทำให้มีสมบัติที่หลากหลายขึ้น ซึ่งสมบัติเหล่านี้ อาจไม่สามารถได้จากฟิล์มเพียงชนิดเดียว โดยเทคโนโลยีในการผลิตฟิล์มหลายชั้นมีหลายวิธี เช่น การอัดรีดร่วม การเคลือบอัดขึ้นรูป หรือการลามิเนต เป็นต้น

2.2.1 Co-Extrusion Blown Film Process [9]

การเป่าฟิล์มชนิดนี้จะคล้ายกับการเป่าฟิล์มชั้นเดียวแต่จะมีเครื่องอัดรีดมากกว่า 1 ตัว โดยเครื่องอัดรีดแต่ละตัวจะหลอมพลาสติกแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของชั้นฟิล์ม จากนั้นจะอัดพลาสติกหลอมผ่านหัวดายน์เดียวกันเพื่อให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มประกบกัน ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เครื่องเป่าฟิล์มแบบหลายชั้น (Co - Extrusion Blown Film Process) [9]

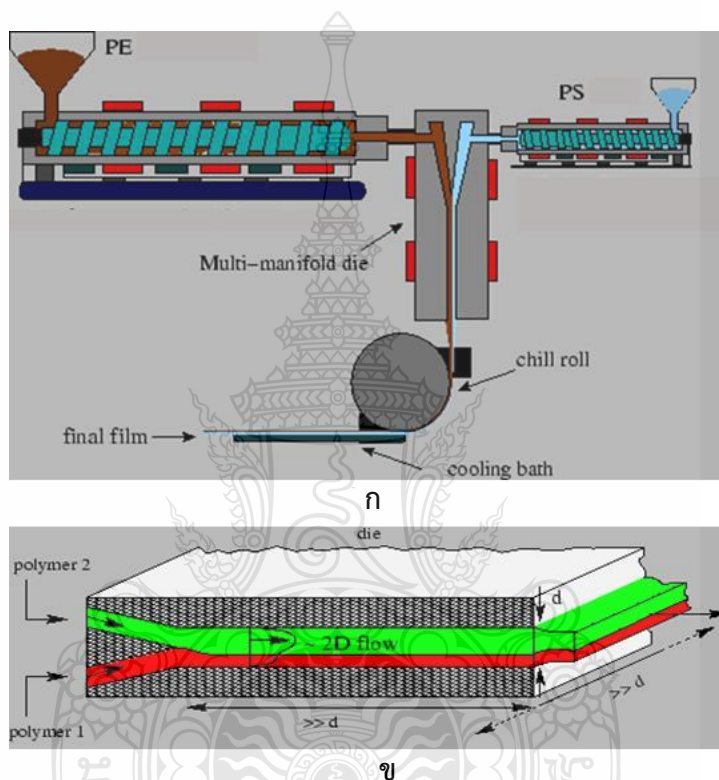
2.2.2 Co-Extrusion Cast Film Process [10]

คือกระบวนการผลิตฟิล์มแผ่นหลายชั้นโดยการนำเอาพลาสติกตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมา ทำให้หลอม จากนั้นอัดรีดออกมาครั้งเดียวผ่านดายน์รูปตัว T (T die) เป็นฟิล์มหลายชั้นในการอัดรีดร่วมจะใช้เครื่องอัดรีดแบบแยกส่วน โดยแต่ละส่วนจะเกิดเป็นชั้นฟิล์ม จากนั้นรีดพลาสติกทุกชนิดผ่านลูกกลิ้งอัด ดังภาพรูปที่ 2.5 ซึ่งประโยชน์ของการกระบวนการอัดรีดร่วม คือทุกชั้นของฟิล์มจะให้คุณสมบัติที่จำเป็น เช่น ทนทานต่อสารเคมี มีความแข็งแรงของรอยปิดผนึกหรือรอยตะเข็บสูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของไขมันหรือน้ำมันได้ดี กระบวนการรีดร่วมสามารถผลิตบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านได้สูงขึ้นความแข็งแรงและความสวยงามมากขึ้น

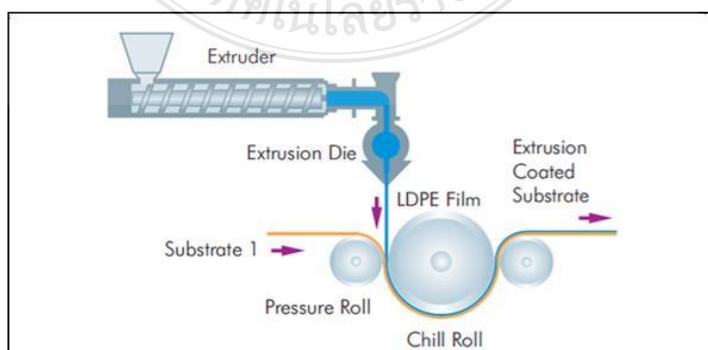
2.2.3 Co - Extrusion Coating [11]

เป็นกระบวนการผลิตวัสดุที่มีเคลือบหลายชั้น โดยมีวิธีการคือ นำพลาสติกมาทำให้หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแล้วอัดรีดผ่านหัวดายน์ลงบนพื้นผิววัสดุที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ ดังแสดง

ในภาพที่ 2.6 เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งวัสดุที่มักจะเคลือบด้วยพลาสติก ได้แก่ กระดาษ อลูมิเนียมฟอยล์ ฟิล์มเซลลูโลสและอื่น ๆ เพื่อเป็นการรวมสมบัติที่ดีที่สุดของวัสดุแต่ละชนิด เข้าด้วยกันเป็นผลิตภัณฑ์เดียว เช่น เพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดหรือรอยพับ ทนต่อสารเคมี การปิดผนึกด้วยความร้อนสำหรับใช้งานบรรจุภัณฑ์ ป้องกันน้ำหรือออกซิเจน และก๊าซอื่น ๆ ได้ดีขึ้น เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 การผลิตฟิล์มหลายชั้น (ก) กระบวนการหล่อฟิล์มรีดรวม (Co - Extrusion Cast Filmprocess) (ข) การแยกชั้นของพลาสติกกระหว่างอยู่ใน Muti - Manifold Die [12]



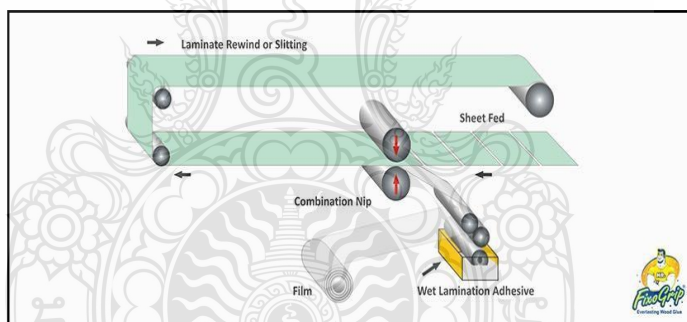
ภาพที่ 2.6 กระบวนการเคลือบรีดรวม (Co - Extrusion Coating Process) [13]

2.2.4 การลามิเนต (Lamination) [14]

คือการนำพลาสติกหลาย ๆ ชั้นมาเคลือบติดเข้าด้วยกันเป็นฟิล์มแผ่นเดียว หรือการเคลือบแผ่นฟิล์มพลาสติกเข้ากับวัสดุอื่น โดยทำการยึดติดระหว่างชั้นของวัสดุด้วยกาว (Adhesive) หรือความร้อน จำนวนชั้นของฟิล์มและชนิดของฟิล์มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จที่จะนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์และเทคโนโลยีในการลามิเนตมีหลายวิธี ดังนี้

1) การลามิเนตเปียก (Wet Lamination) [15]

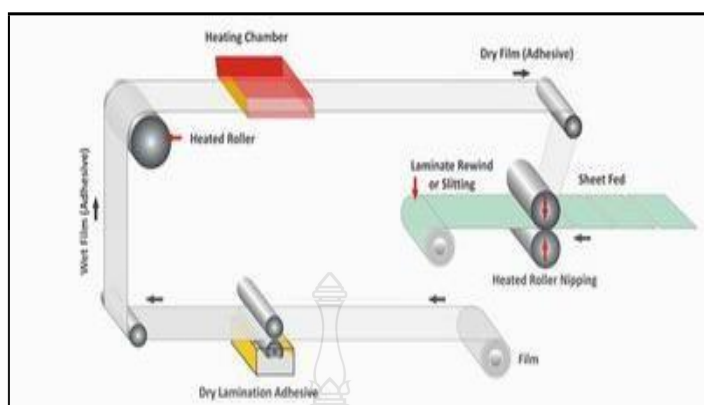
เป็นกระบวนการลามิเนตโดยใช้กาว มาเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างชั้นฟิล์มหรือชั้นวัสดุ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มแต่ละชั้นไม่สามารถเข้ากันได้ โดยกาวที่ใช้จะมีน้ำเป็นส่วนประกอบ และสารยึดเกาะยังคงอยู่ในสถานะของเหลวเมื่อเชื่อมประสานวัสดุต่อเข้าด้วยกัน เทคนิคนี้นิยมใช้ในการประกบติดฟิล์มพลาสติกหรือวัสดุอื่น ๆ เช่น อลูมิเนียมฟอยล์ กระดาษ ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 กระบวนการลามิเนตแบบเปียก [15]

2) การลามิเนตแห้ง (Dry Lamination) [16]

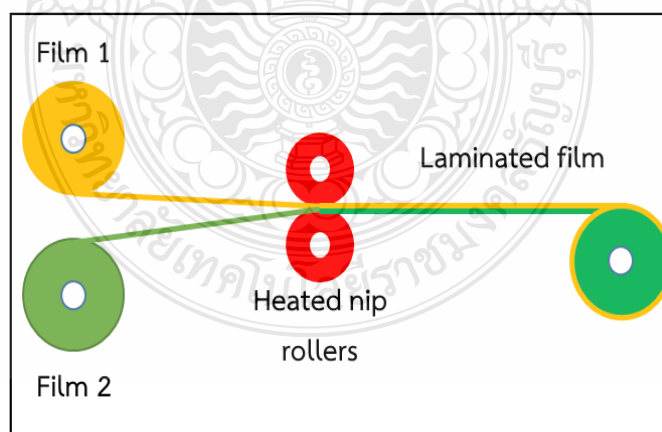
เป็นกระบวนการประกบฟิล์มพลาสติก กระดาษ อลูมิเนียมฟอยล์เข้าด้วยกัน โดยอาศัยกาวที่มีตัวทำละลายเป็นส่วนประกอบในการเชื่อมยึดกันไว้ในแต่ละชั้น กาวประเภทนี้จะแห้งและแข็งตัวเร็วกว่า โดยหลักการประกบแห้งจะมีความแตกต่าง จากการประกบเปียกที่หลังจากการตากอบบนผิววัสดุแล้วแทนที่จะประกบกับวัสดุอื่นทันที แต่กระบวนการนี้วัสดุต้องผ่านการอบเพื่อให้ตัวทำละลายที่อยู่ในกาวระเหยออกไปก่อน จากนั้นจึงนำไปประกบติดกับวัสดุอีกชนิดหนึ่งด้วยการผ่านที่ลูกกลิ้งร้อน ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กระบวนการลามิเนตแบบแห้ง [16]

3) การลามิเนตร้อน (Hot Lamination) [16]

เป็นกระบวนการผลิตฟิล์มลามิเนตแบบสองชั้นโดยฟิล์มจะถูกส่งไปยังลูกกลิ้งความร้อน เพื่อให้ความร้อนทำให้ฟิล์มประสานติดกัน จากนั้นฟิล์มจะถูกส่งไปยังลูกกลิ้งร้อน (Heat Roll) ที่ยังคงให้ความร้อนต่อเนื่องอยู่เพื่อรักษาความหนาและขนาดของฟิล์มให้คงที่ก่อนจะทำการม้วนเก็บ การลามิเนตด้วยวิธีนี้จะนิยมใช้กับฟิล์มบาง ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การลามิเนตร้อน [16]

2.3 การรีไซเคิล (Recycling) [17]

2.3.1 ความหมายของการรีไซเคิลพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM 5033-90

หมายถึงขยะพลาสติกหลังผ่านกระบวนการผลิตหรือใช้งานแล้ว ได้ถูกนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อแปรรูป เป็นผลิตภัณฑ์อีกครั้ง โดยแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ

1) การรีไซเคิลปฐมภูมิ (Primary Recycling)

เป็นการนำขยะ หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วที่เป็นประเภทเดียวกัน และไม่มีสิ่งปนเปื้อนกลับมาใช้ซ้ำในรูปของผลิตภัณฑ์เดิม หรือใกล้เคียง โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมด หรือเติมผสมกับเม็ดใหม่

2) การรีไซเคิลทุติยภูมิ (Secondary Recycling)

เป็นการนำขยะ หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาทำความสะอาด และทำการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง โดยผลิตภัณฑ์ ที่ได้จะแตกต่างจากการใช้งานในครั้งแรก เช่น การรีไซเคิลทางกายภาพ (Physical Recycling) เป็นเทคนิคที่ง่าย และนิยมใช้มากที่สุด การรีไซเคิลทางกายภาพเป็นการคัดแยกพลาสติกตามประเภทแล้วนำมาล้างทำความสะอาดก่อนทำการบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากการรีไซเคิลทางกายภาพเป็นการหลอมขึ้นรูปใหม่ ทำให้โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่หลอมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

3) การรีไซเคิลตติยภูมิ (Tertiary Recycling)

เป็นการนำขยะ หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาเข้าสู่กระบวนการแปรรูป เพื่อเป็นวัตถุดิบตั้งต้นอีกครั้งการรีไซเคิลทางเคมี (Chemical Recycling) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือ แตกออกได้เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) หรือ โอลิโกเมอร์ (Oligomer) และการรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis) สามารถแบ่งออกได้ 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) นอกจากนี้ยังมีการย่อยสลาย เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) ไกลโคลิซิส (Glycolysis) เป็นต้น โดยวิธีการดังกล่าวทำให้ได้มอนอเมอร์และสารเคมีตั้งต้น ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือสารเคมีอื่น ๆ ได้

4) การรีไซเคิลจตุภูมิ (Quaternary Recycling)

เป็นการนำพลาสติกมาเผาเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ข้อดีของการรีไซเคิลวิธีนี้คือ ไม่ต้องคัดแยกประเภทขยะพลาสติกก่อนนำมาเผา ซึ่งช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย และเวลาในการรีไซเคิลได้อีกทั้งยังช่วยลดขยะออกจากสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าวิธีฝังกลบ หรือนำขยะไปถมที่แหล่งน้ำและยังได้พลังงานทดแทน

2.3.2 การรีไซเคิลพลาสติก [18]

การรีไซเคิลหรือการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ เป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติก และยังช่วยลดปริมาณการใช้งานพลาสติกใหม่ เป็นการนำพลาสติกกลับมาหมุนเวียนทำให้สามารถใช้งานพลาสติกได้นานขึ้น ลดปริมาณการใช้งานวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น ปิโตรเลียมและถ่านหิน นอกจากนี้การรีไซเคิลยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการฝังกลบ การเผาขยะซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของดิน น้ำ และอากาศ พลาสติกที่จะนำมารีไซเคิลหรือหลอม เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ พลาสติกที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Pre - Consumer Wastes) ซึ่งยังเป็นพลาสติกที่มีคุณภาพดี และพลาสติกที่เป็นของเสียที่ผ่านการใช้งานแล้ว และทิ้งเป็นขยะ (Post - Consumer Wastes) พลาสติกเหล่านี้เมื่อนำกลับมาหลอมใช้งานใหม่จะต้องผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1) พลาสติกที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ต้องผ่านขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ เช่น สี ความสะอาด และคัดแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ จากนั้นจึงนำบดเป็นเกล็ดพลาสติกที่มีขนาดใกล้เคียงกันแล้ว จึงนำไปหลอมผ่านเครื่องอัดรีด (Extruder) เพื่อตัดเป็นเม็ดพลาสติกอีกครั้ง

2) พลาสติกที่เป็นของเสียที่ผ่านการใช้งานแล้ว เช่น ขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ จะมีขั้นตอนที่ยุ้งยากมากกว่า คือต้องผ่านขั้นตอนการแยกสิ่งเจือปน เช่น เศษวัสดุอื่น ๆ รวมถึงพลาสติกที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ จากนั้นจึงนำไปบดแล้วจึงนำไปล้างทำความสะอาด ทำการแยกพลาสติกคนละประเภทออกจากกัน โดยทั่วไปจะใช้วิธีการแยกโดยอาศัยสมบัติความหนาแน่นของพลาสติกที่แตกต่างกัน เช่นการลอยน้ำและการจมน้ำ เป็นต้น ขั้นตอนต่อจากนั้นต้องนำพลาสติกมาอบแห้งแล้วจึงนำไปหลอมใน เครื่องอัดรีด และทำการตัดเป็นเม็ดพลาสติกอีกครั้ง

2.3.3 กระบวนการรีไซเคิลพลาสติก [19]

การรีไซเคิลเพื่อนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ ปกตินิยมใช้กระบวนการรีไซเคิลเชิงกลซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการหลอมพลาสติก ข้อดีของกระบวนการนี้คือไม่ยุ่งยากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีค่าใช้จ่ายไม่สูง แต่มีข้อเสียคือ เนื่องจากพลาสติกที่นำมารีไซเคิลต้องได้รับความร้อนและแรงต่าง ๆ ในกระบวนการหลอมผลิตซ้ำ จึงทำให้มีการเสื่อมสภาพและการแตกสลายของโมเลกุลอย่างมากระหว่างกระบวนการแปรรูป ทำให้สมบัติทางกายภาพของพลาสติกลดลงโดยความร้อน แรงเฉือน ปฏิกิริยาเคมีและออกซิเจน ซึ่งต่างเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของพลาสติกทั้งสิ้น

ขั้นตอนแรกจะนำขยะพลาสติกมาทำการตรวจสอบแยกสิ่งเจือปนที่ไม่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เช่น แก้ว เทอร์โมเซตพลาสติก ไม้ รวมถึงการแยกประเภทของพลาสติกเบื้องต้น เช่น ขวดน้ำดื่มเพท ขวดน้ำดื่มพีอี ฝาขวด เป็นต้น จากนั้นนำมาทำความสะอาด และทำการบดให้เป็นเกล็ดพลาสติก

ขนาดเล็กด้วยเครื่องบดย่อยขนาด แล้วทำการแยกประเภทของเกล็ดพลาสติกอีกครั้ง ซึ่งอาจใช้วิธีการแยกจากความหนาแน่นของพลาสติก เช่น การลอย และจมในน้ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับ จึงนำมาอบ หรือตากให้แห้ง นำเกล็ดพลาสติกที่ได้ไปหลอมในเครื่องอัดรีด ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจมีการผสมสารเติมแต่งพลาสติกต่าง ๆ เช่น สี สารปรับสภาพพลาสติก (Stabilizer) ฟิลเลอร์ สารหล่อลื่น (Lubricant) หรือสารอื่น ๆ เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของพลาสติก ปรับปรุงสมบัติของพลาสติก หรือช่วยกระบวนการผลิต

การหลอมด้วยพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องหรือเศษพลาสติกจะถูกนำเข้าสู่เครื่องอัดรีดผ่านทางกรวยเติม (Hopper) เข้าสู่กระบอกล (Barrel) ซึ่งมีฮีตเตอร์ (Heater) เป็นตัวให้ความร้อนภายในกระบอกลจะมีสกรู (Screw) พลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจะอยู่ในสถานะของหลอมไหล สกรูจะทำหน้าที่หมุนเพื่อส่งพลาสติกหลอมด้วยความดันไปยังหัวดายน์ (Die) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนปลายเปิด ก่อนออกจากหัวดายน์พลาสติกหลอมจะผ่านการกรองสิ่งเจือปนอีกครั้ง พลาสติกที่ออกจากดายน์มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง (Extrudate) ทำให้เย็นโดยการดึงผ่านน้ำ แล้วจึงนำมาตัดเป็นเม็ด ลักษณะของเม็ดตัดจะเป็นรูปทรงกระบอกลมีขนาดใกล้เคียงกัน

2.3.4 สมบัติของพลาสติกรีไซเคิล [20]

พลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลหรือการนำกลับมา แปรรูปใหม่จะมีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม ผลิตรภัณฑ์ที่ได้มักมีสมบัติต่าง ๆ ลดลง เนื่องจากในขั้นตอนการบดพลาสติกได้รับแรงเฉือนเชิงกล (Mechanical Shear) และในขั้นตอนการหลอมพลาสติกต้องผ่านความร้อนและแรงเฉือนอีกครั้ง ทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดสั้นลง เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทั้งทางด้านกายภาพและเชิงกล โดยทั่วไปพลาสติกที่ผ่านการรีไซเคิลหลาย ๆ ครั้งมักจะมียืดหยุ่นไปจากเดิมมีความกรอบมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างทางโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลให้มีความหนืดลดลง การดึงผ่านน้ำยากขึ้น การนำพลาสติกรีไซเคิลมาใช้งานโดยทั่วไปนิยมนำมาใช้งาน 2 แบบด้วยกัน คือ นำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยการนำมาผสมกับสีดำหรือสีที่มีความเข้มข้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสมบัติของพลาสติกสูงมากนัก มีราคาถูก เช่น ตะกร้า ถังขยะสีดำ เป็นต้น

การใช้งานอีกแบบหนึ่ง คือ การนำพลาสติกรีไซเคิลไปผสมกับเม็ดใหม่เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อลดปริมาณการใช้เม็ดพลาสติกใหม่ซึ่งมีราคาสูงกว่า โดยทั่วไปการผสมเม็ดใหม่กับเม็ดรีไซเคิลมักจะใช้อัตราส่วนของเม็ดรีไซเคิลประมาณ 20 % เม็ดใหม่ 80 % ซึ่งส่งผลให้สมบัติของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก หรืออาจผสมเม็ดรีไซเคิลเพิ่มขึ้นเป็น 50 % หรือมากกว่าก็ได้ เนื่องจากอัตราส่วนผสมระหว่างเม็ดใหม่กับเม็ดรีไซเคิลไม่มีเกณฑ์ที่แน่ชัด ขึ้นอยู่กับว่าผู้ผลิตว่าต้องการคุณภาพของผลิตภัณฑ์มากหรือ

น้อยเพียงไรนั้น ทั้งนี้ให้พิจารณาจากสมบัติของผลิตภัณฑ์ว่าสามารถยอมรับได้หรือไม่หรือผ่านเกณฑ์คุณภาพที่ผู้ผลิตกำหนดไว้หรือไม่

2.4 พอลิเมอร์ผสม (Mixed polymer) [21]

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ได้รับความนิยมมากกว่า การเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ ๆ เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า โดยการนำพอลิเมอร์ ชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดที่มีสมบัติต่างกันมาผสมเพื่อปรับให้มีสมบัติตามต้องการ การเตรียม พอลิเมอร์ผสมสามารถทำได้ทั้งในขั้นตอนของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือการผสมพอลิเมอร์ แบบหลอมเหลว (Melt Blending) โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) หรือเครื่องอัดรีด เป็นต้น หลักในการเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมควรพิจารณาจากความเข้ากันได้ (Compatibility) หรือความรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscibility) ของพอลิเมอร์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแยกวัฏภาค ซึ่งสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้

- กระบวนการที่ใช้ในการผสม
- ประเภทของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม
- ภาวะที่ใช้ในการผสม
- สัดส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมจะประกอบ

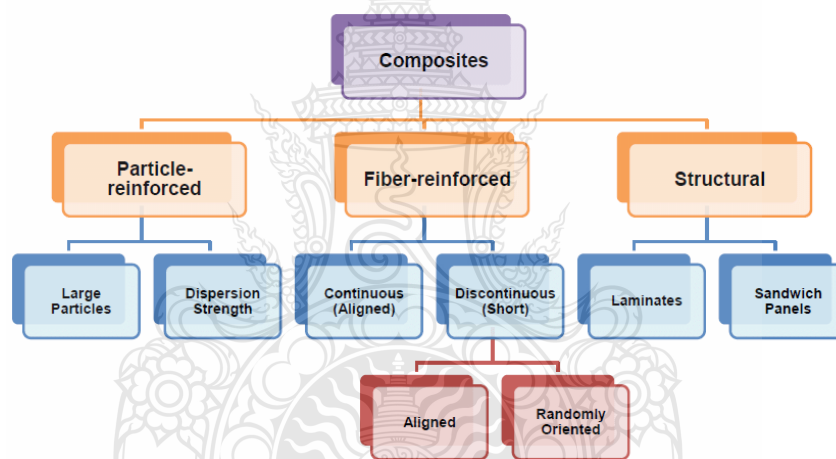
ด้วยพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ ที่ต่อเนื่อง (Continuous Matrix) และถ้าหากการกระจายตัวของพอลิเมอร์ในเนื้อหลักไม่สม่ำเสมอ อาจส่งผลให้เกิดข้อบกพร่อง (Defect) ของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดการแยกวัฏภาค (Phase Separation) ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นการเลือกคู่ของพอลิเมอร์ผสม จึงมีความสำคัญต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

2.5 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) [22]

วัสดุคอมโพสิต หมายถึงวัสดุที่มีองค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมกัน และอยู่ด้วยกัน (Distinct Components) โดยไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็น เนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่าเนื้อหลัก (Matrix) ซึ่งจะอยู่ ด้วยกันอย่างต่อเนื่อง และล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสที่กระจาย (Dispersed Phased) หรือ เฟสเสริมแรง (Reinforcement) สมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะเป็นฟังก์ชัน หรือขึ้นกับสมบัติ ปริมาณของสารตั้งต้น และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว

องค์ประกอบหลักของวัสดุคอมโพสิตนั้น แบ่งได้ 2 ส่วนคือ เมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุ ที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบ

และปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เมทริกซ์เป็นเฟสที่มีความต่อเนื่อง (Continuous Phase) โดยทั่วไปเมทริกซ์จะมีความแข็งแรง และมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง แต่จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load Transfer Medium) ไปยังส่วนเสริมแรงวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์สามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ ถ้าเป็นพอลิเมอร์เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่าพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composite) ซึ่งเมทริกซ์กลุ่มนี้มีทั้งประเภทเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติก กลุ่มที่ 2 คือ โลหะซึ่งเรียกว่าโลหะคอมโพสิต (Metal Composites) และกลุ่มสุดท้ายคือ เซรามิกส์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่าเซรามิกส์คอมโพสิต (Ceramic Composites) ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ทำหน้าที่หลักเป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิตที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง เช่น เส้นใย แก้ว เส้นใยคาร์บอน อนุภาคของแร่ เป็นต้น การแบ่งประเภทวัสดุคอมโพสิตโดยใช้เกณฑ์โดยทั่วไปแบ่งได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การแบ่งประเภทของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้สารเสริมแรงหรือโครงสร้างเป็นเกณฑ์ [23]

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตมีวัตถุประสงค์ทั่วไป คือ เป็นการนำสมบัติเด่นของวัสดุเนื้อหลัก และสารเสริมแรงมาผสมเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น หรือมีสมบัติพิเศษที่เพิ่มขึ้นมา และมีประโยชน์มากกว่าวัสดุตั้งต้น เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานการสึกหรอ ความเป็นฉนวนทางความร้อน เป็นฉนวนไฟฟ้าและความสวยงาม เป็นต้น [24]

ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต [25]

1. ข้อดีของคอมโพสิต

- มีผลต่อสมบัติของน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties To Weight/Density Ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) มอดุลัสจำเพาะ (Specific Modulus)

ความแข็งตึงจำเพาะ (Specific Stiffness) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา

- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
 - มีสมบัติหลากหลาย สามารถออกแบบและสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใยเสริมแรงจัดเรียงตัวตามแนวรับแรง เป็นต้น
 - มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
 - มีสมบัติการรับแรงที่ดีมีความทนทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) ดี
- นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional Stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients Of Thermal Expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะ

2. ข้อเสียของคอมโพสิต

- มีต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต
- มักแสดงสมบัติเป็นวัสดุแบบแอนไอโซทรอปี (Anisotropy Materials) คือมีสมบัติในแต่ละทิศทางนั้นไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรงเป็นสาเหตุให้คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse Direction) มีความแข็งแรงไม่เท่ากัน นอกจากนี้การต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น การตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต ตลอดจนการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ทำได้ยาก

2.6 สารตัวเติม (Fillers) [26]

สารตัวเติม หมายถึง สารที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่ผสมในพอลิเมอร์ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเชิงกลให้ดีขึ้น ช่วยในกระบวนการผลิตหรือเป็นการลดต้นทุนและอายุการใช้งาน

2.6.1 แคลเซียมคาร์บอเนต Calcium Carbonate

สูตรทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตคือ CaCO_3 มีสมบัติเฉพาะ คือ ไม่เป็นพิษ มีความขาว (Whiteness) และความสว่าง (Brightness) สูง จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวเติม (Filler) และตัวเพิ่มปริมาณ (Extender) ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี พียูซีและยาง แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 กลุ่ม คือ

- แคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติ
 - แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์
- 1) การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมี 2 วิธี คือ
- แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ (Ground Calcium Carbonate, CC)

เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบด เช่น หินปูน (Limestone) ที่มีความขาวและความบริสุทธิ์สูง หินอ่อน (Marble) ที่เกิดจากหินปูนแปรสภาพด้วยความร้อนและความดัน ทำให้ตกผลึกใหม่ ชอล์ก (Chalk) ซึ่งเป็นหินปูนเนื้อร่วนละเอียด และแร่แคลไซต์ (Calcite) เป็นต้น การบดเพื่อลดขนาดแร่ (Size Reduction) และการคัดขนาด (Classification) ถือเป็นขั้นตอนสำคัญของการแต่งแร่ในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ ตามที่ตลาดต้องการ

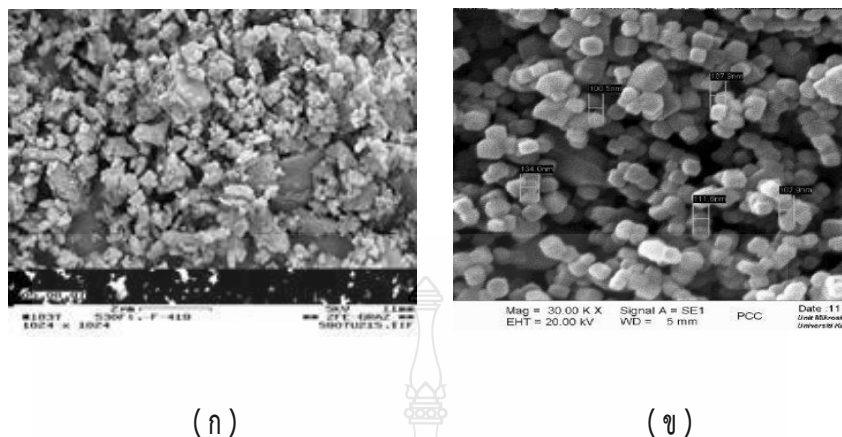
- แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก (Precipitated Calcium Carbonate, PCC) เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติ (GCC) มาทำการตกผลึกใหม่ให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ที่มีคุณภาพสูงมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กขนาด 0.3 - 1 ไมโครเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกผลึกอาจมีรูปร่างของผลึกแตกต่างกันตามวิธีการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะเป็นรูป เข็ม หรือ Rhomboids ผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีสีขาวไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เสถียรในอากาศและไม่ละลายน้ำ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่

2) แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการสังเคราะห์จากวัตถุดิบ คือ หินปูน Ca(OH)_2

เตรียมโดยการนำไปตกตะกอนแล้วทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ เช่น CO_2 หรือ Na_2CO_3 ปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการที่ 1 และ 2 เป็นต้น



เหตุผลที่นิยมใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในพลาสติก คือ ไม่มีกลิ่น มีค่าดัชนีการหักเหต่ำทำให้ผสมสีอื่น ๆ ได้ง่าย มีค่าความแข็งต่ำ ไม่จับตัวเป็นก้อน สามารถผสมเข้ากับสารอื่น ๆ ได้ง่าย และยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติก คือช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทก ความทนต่อแรงฉีกขาด ความทนแรงดึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ความทนต่อสถานะแวดล้อม และเพิ่มความมันวาวให้กับชิ้นงาน แต่แคลเซียมคาร์บอเนตก็มีข้อเสียอยู่บางประการ เช่น เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือที่ละลายน้ำ เมื่อได้รับความร้อนถึง 800 - 900 °C จะสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)



ภาพที่ 2.11 SEM Of Ground Calcium Carbonate (GCC) SEM Of Precipitated Calcium Carbonate (PCC) [17]

การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในพลาสติก ส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มเนื้อลดต้นทุน นอกจากนั้นยังสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทก เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ได้ แต่ส่งผลกระทบต่อสมบัติความทนแรงดึง และความแข็งดึงทำให้ลดลงได้ ปริมาณการเติมนิยมเติมในช่วงร้อยละ 10 - 40 ถ้ามีการเติมสารตัวเติมนี้ในปริมาณมากจะส่งผลให้การกระจายตัวไม่ดีพอ ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนมีความไม่แน่นอน

2.6.2 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite) [27]

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่แคลเซียมเมตาซิลิเกต (Calcium Metasilicate) มีสูตรเคมีเป็น CaSiO_3 หรือ CaOSiO_2 อัตราส่วนของ Si : O เป็น 1 : 3 ประกอบ CaO 48.3 % และ SiO_2 51.7 % มีค่า pH ประมาณ 9.9 โวลลาสโทไนต์เป็นแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยจะมีมวลพวก Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , K_2O และ Na_2O ปนมาบ้างเล็กน้อย มักเกิดร่วมกับแร่ Calcite, Diopside, Dolomite, Quartz เนื่องจากการเกิดนั้นสามารถเกิดได้ทั่วไป โดยกระบวนการเกิดเป็นแบบ Thermal Metamorphosis ของหิน ประเภท Siliceous Carbonate ซึ่งจะแทรกอยู่ในพวกหินอัคนี (Igneous Rock) โวลลาสโทไนต์มีโครงสร้างผลึกอยู่สามแบบคือที่เป็น Polymorphism กัน ได้แก่

- โวลลาสโทไนต์ 1T เป็นโวลลาสโทไนต์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น Triclinic
- โวลลาสโทไนต์ 2M เป็นโวลลาสโทไนต์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น Monoclinic
- โวลลาสโทไนต์ 7A Pseudowollastonite หรือ Cyclo - Wollastonite เป็น

โวลลาสโทไนต์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น Triclinic



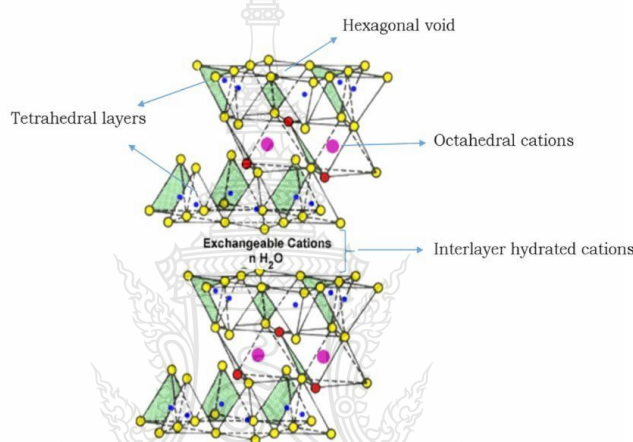
ภาพที่ 2.12 โวลลาสโทไนต์ (ก) แร่โวลลาสโทไนต์ที่พบในธรรมชาติ [28] (ข) ผงโวลลาสโทไนต์ [29]
(ค) ผลึกของโวลลาสโทไนต์ [30]

โวลลาสโทไนต์มีการเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ และยังใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง อุตสาหกรรมสี การเคลือบสี (Coating) อุตสาหกรรมผ้าเบรก และวัสดุขัดถูในอุตสาหกรรมพลาสติกนิยมใช้งานโวลลาสโทไนต์กับพลาสติกวิศวกรรม เช่น ไนลอน พอลิเอสเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาเป็นฟิลเลอร์ร่วมกับใยหินในการทำผลิตภัณฑ์จากฟีนอลิกเรซิน (เช่น ผ้าเบรก) เพื่อลดต้นทุนการผลิต และยังเป็นการลดอันตรายจากการใช้ใยหินปริมาณสูง ๆ ด้วย เช่นเดียวกับฟิลเลอร์ชนิดอื่น ๆ ในการทำให้โวลลาสโทไนต์กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น สามารถทำได้โดยการปรับแต่งพื้นผิวด้วยซิลเลน นอกจากช่วยเรื่องการกระจายตัวแล้วยังช่วยปรับปรุงการก่อพันธะกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ในอุตสาหกรรมเซรามิกและวัสดุก่อสร้างมีการใช้งานโวลลาสโทไนต์เป็นจำนวนมาก และอุตสาหกรรมพลาสติกจะใช้โวลลาสโทไนต์ในการปรับปรุงค่าความแข็งแรง หรือเป็น Active Filler เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นแบบผลึกรูปเข็ม (Needle - Like Structure) นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงเรื่องความเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความทนไฟดีขึ้น และช่วยเรื่องขนาดของชิ้นงานให้ไม่ผันแปรมากเกินไป สำหรับโวลลาสโทไนต์ที่เป็นเกรดที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะช่วยปรับปรุงเรื่องความทนทานต่อการขีดข่วน และการกระแทกได้ดี งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้โวลลาสโทไนต์ เพื่อปรับปรุงสมบัติพลาสติกมีหลายด้าน [31]

2.6.3 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillinite) [32]

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีโครงสร้างเป็นผลึกเป็นแผ่นหรือชั้นของสารประกอบซิลิเกตซ้อนกัน มีสูตรโมเลกุล $\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ มีค่า Aspect Ratio สูง นิยมนำไปใช้เสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์พื้นผิวของเลเยอร์ซิลิเกต (Layered Silicate) จะมีประจุลบ โดยแต่ละชั้นสามารถยึดกันด้วยประจุบวกของโซเดียมไอออน (Na^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นต้น ทำหน้าที่ยึดชั้นของซิลิเกตไว้ด้วยกัน และเนื่องจากแร่ดินชนิดนี้มีโครงสร้างที่ซ้อนกันอย่างมีระเบียบทำให้ยากต่อการผสมกับพอลิเมอร์ จึงนิยมทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งวิธี

การที่นิยมใช้ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ คือ การทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ โดยใช้สารอินทรีย์ที่มีประจุบวก เช่น Quaternary Ammonium Salt หรือ Phosphonium Salt เพื่อให้เกิดการแทนที่ประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของซิลิเกต ทำให้ได้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร หรือออร์แกโนเคลย์ (Organoclay) มอนต์มอริลโลไนต์ในธรรมชาติส่วนใหญ่ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการดัดแปรจะพบประจุบวกแทรกอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้าง ทำให้สามารถขยายตัวได้ เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจนทำให้ประจุบวกเข้าแทรกในระหว่างชั้น และเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่าย อนุภาคมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01 - 0.1 μm ชนิดของมอนต์มอริลโลไนต์ แบ่งออกตามองค์ประกอบที่มีธาตุโซเดียมและแคลเซียม



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [33]

ประโยชน์ของมอนต์มอริลโลไนต์ [33]

- เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุพอลิเมอร์
- เพิ่มความสามารถในการเป็นฉนวนที่ป้องกันการลามไฟได้
- สกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ
- เพิ่มความทนทานต่อสารเคมี

2.7 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน [34]

2.7.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากในงานวิศวกรรม โดยทั่วไปสมบัติชนิดนี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการตัดสินใจเลือกใช้ชนิดพลาสติก สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงกระทำของพลาสติก กล่าวคือเมื่อพลาสติกได้รับแรงกระทำจากภายนอก จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ในที่สุด ดังนั้นสมบัติเชิงกล

จึงเป็นตัวที่บ่งชี้พฤติกรรมของพลาสติกภายใต้แรงหรือน้ำหนักที่มากระทำพฤติกรรมการตอบสนองแรงที่มากระทำนั้นจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้าง การจัดเรียงโมเลกุล และจุดบกพร่องภายในโมเลกุลของพลาสติก

นอกจากนี้ชนิดของแรงที่กระทำและลักษณะของแรงที่ใส่เข้าไป เช่น แรงดึง แรงกระแทก เป็นต้น ยังสามารถทำให้พฤติกรรมของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการทดสอบสมบัติเชิงกลมักจะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของพลาสติกเมื่อมีแรงมากระทำ และไม่ว่าแรงจะอยู่ในลักษณะใดก็ตาม ย่อมทำให้พลาสติกเกิดความเค้น และความเครียดซึ่งเป็นการตอบสนองแรงที่มากระทำ

1) ความเค้น (Stress, σ) คือ แรงต้านทานภายในของวัสดุ (พลาสติก) ที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง โดยแรงต้านทานนี้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ได้รับแรงนั้น ดังนั้นความเค้นจะเท่ากับอัตราส่วนของแรงที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุนั้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการพื้นฐานได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

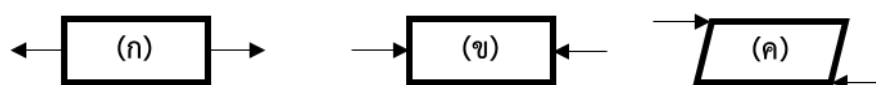
โดยที่ σ = Stress

F = Force

A = Area

หน่วยของความเค้น คือ ปอนด์/นิ้ว² (lb/in², psi) ถ้าเป็นระบบ SI Unit (System Of International Units) จะใช้ นิวตัน/เมตร² (N/m²) หรือพาสคัล (Pascal, Pa) ซึ่ง 1 Pa = 1 N/m² แต่หน่วยความเค้นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก มักอยู่ในระดับเมกะพาสคัล (MPa) ซึ่ง 1 MPa = 1 N/mm²

2) ความเครียด (Strain, ϵ) จะพิจารณาในรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่างตามทิศทางแรงที่มากระทำ เช่น เมื่อได้รับแรงดึงวัสดุจะยืดตัวออก (Elongate) เมื่อได้รับแรงอัดวัสดุจะหดตัวเข้า (Contract) หรือเมื่อได้รับแรงเฉือนวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเป็นมุม ตามภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ลักษณะแรงกระทำ (ก) แรงดึง (ข) แรงอัด (ค) แรงเฉือน

ความเครียดจะไม่มีหน่วย แต่ในทางวิศวกรรมนิยมนิยามรายงานในรูปของเปอร์เซ็นต์ (%) ของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า ความเครียด คืออัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการยืดหรือหดตัวต่อความยาวเดิมของวัสดุก่อนได้รับแรงกระทำ (กรณีแรงกระทำเป็นแรงดึงหรือแรงอัด) ซึ่งสามารถเขียนสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

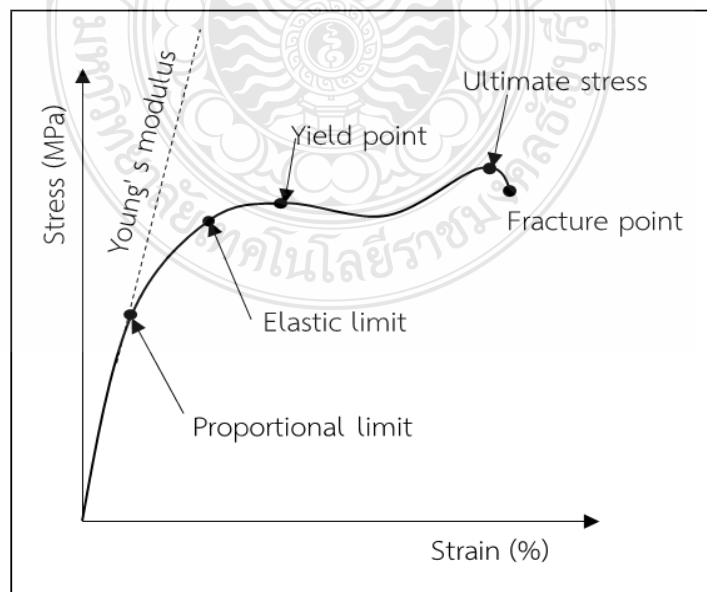
$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

หรือ
โดย

$$\% \text{ Elongation} = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

ε = ความเครียด
 L = ความยาวเดิมของวัสดุ
 L_0 = ความยาวใหม่หลังได้รับแรงกระทำ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain Relationship) เมื่อให้แรงกระทำโดยการดึงต่อพลาสติก จะทำให้เกิดความเค้นและความเครียดขึ้นในชิ้นงานและเมื่อนำค่าทั้งหมดมาพล็อตเป็นกราฟ โดยให้กราฟแนวนอนเป็นความเครียดและกราฟแนวตั้งเป็นความเค้น จะได้กราฟของ ความเค้น - ความเครียด ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ภาพแบบกราฟความเค้น - ความเครียด [35]

3) ความเหนียว (Toughness) ความเหนียวสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น - ความเครียด โดยพื้นที่ใต้กราฟแสดงถึงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไว้ก่อนเกิดการแตกหัก ในกรณีที่กราฟแสดงพื้นที่ใต้กราฟมาก แสดงว่าพลาสติกมีความเหนียวสูง ในทางวิศวกรรมการวัดค่าความเหนียวจะหมายถึง ค่าพลังงานที่ใช้ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก ซึ่งแตกต่างจากความแข็งแรงซึ่งวัดค่าจากความเค้นที่ใช้ ทำให้พลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือแตกหัก

4) ความแข็งแรง (Strength) ความแข็งแรงเป็นความสามารถของพลาสติกที่ต้านแรงที่มากระทำในรูปต่าง ๆ เช่น แรงดึง แรงอัด เป็นต้น โดยไม่เกิดการแตกหัก เช่น ในกรณีแรงที่มากระทำเป็นแรงดึง จะเรียกว่าความทนแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งก็คือความเค้นแรงดึงสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งได้ว่า

$$\text{Tensile Strength} = \frac{\text{maximum tensile force}}{\text{original cross - section area}}$$

5) ยังส์มอดุลัส (Young's Modulus) หรือ อีลาสติคมอดุลัส (Elastic Modulus Or Modulus Of Elasticity, E) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความเครียดอีลาสติค ความเค้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad \text{มีหน่วยเป็น MPa}$$

6) การคืบ (Creep) คือ ปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูปร่างของพลาสติกเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ภายใต้ความเค้นคงที่ ดังนั้นการคืบจึงเป็นฟังก์ชันของเวลา การทดสอบการคืบมักทำภายใต้แรงดึง โดยการให้น้ำหนักคงที่กับชิ้นทดสอบและไม่เกินขีดจำกัดความยืดหยุ่นของพลาสติกโดยทั่วไป เมื่อได้รับความเค้นพลาสติกจะยืดออกทันที และเมื่อนำความเค้นออกชิ้นพลาสติกจะหดตัวกลับสู่สภาพเดิม แต่ถ้าดึงทิ้งไว้นาน ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออกอย่างถาวร

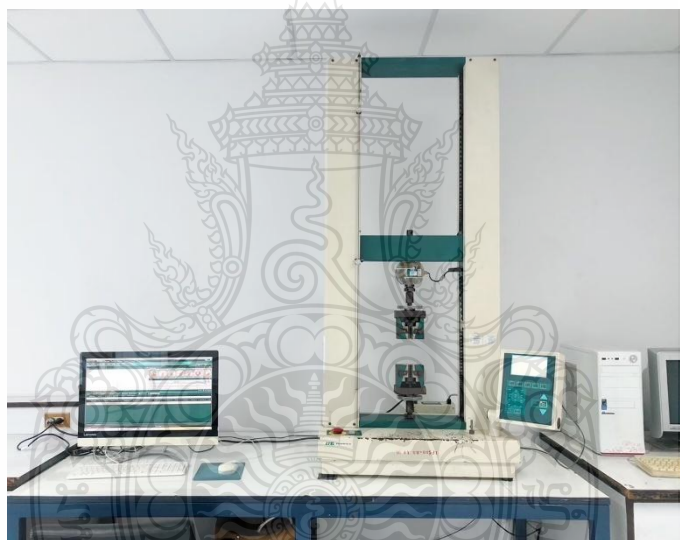
7) การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบความเค้น - ความเครียดของพลาสติกภายใต้แรงดึง โดยการให้แรงดึงกระทำกับชิ้นทดสอบจนขาด ซึ่งจะได้ผลจากการทดสอบ คือ

- ความทนแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งก็คือค่าความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดึง
- % การยืดตัว (% Elongation) คือความยาวของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปจากความยาวเริ่มต้น

- จุดคราก (Yield Point) คือ จุดที่วัสดุได้รับความเค้นสูงสุด โดยวัสดุจะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร

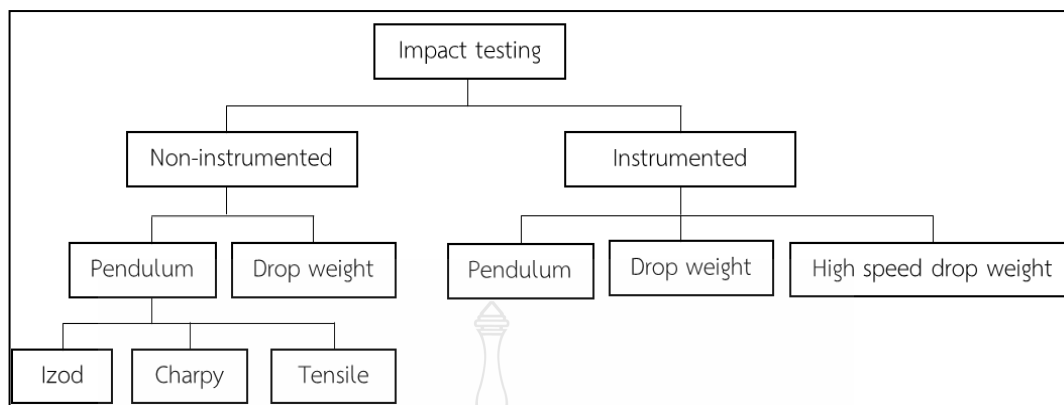
- มอดุลัสแรงดึง (Tensile Modulus) ซึ่งวัดได้จากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น - ความเครียด

นอกจากนี้ยังมีค่าอื่น ๆ เช่น % การยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation At Break) ความทนแรงดึง (Tensile Strength At Break) ความเครียดสูงสุด (Maximum Stress) เป็นต้น แต่โดยทั่วไปมักจะพิจารณาเพียงค่าความทนแรงดึง % การยืดตัวและค่ามอดุลัสแรงดึงเป็นตัวแรก ๆ เสมอ การทดสอบแรงดึงจะทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile Testing Machine) ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

8) ความทนแรงกระแทก (Impact Property) ความทนแรงกระแทกเป็นสมบัติด้านความแข็งแรงของพลาสติก เมื่อได้รับแรงกระทำโดยทันทีทันใดจนเกิดการแตกหักเสียหายภายในระยะเวลาอันสั้น ค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) จะดูจากค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก พลาสติกที่มีความทนแรงกระแทกต่ำ (Low Impact Strength) จะเป็นพลาสติกที่มีความเปราะ (Brittle Plastics) เช่น พอลิสไตรีน (PS) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ส่วนพลาสติกที่มีความทนแรงกระแทกสูง (High Impact Strength) จะเป็นพลาสติกเหนียว (Tough Plastics) เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิคาร์บอเนต (PC) เป็นต้น การทดสอบความทนแรงกระแทกมีด้วยกันหลายวิธี ดังแผนภูมิในภาพที่ 2.17

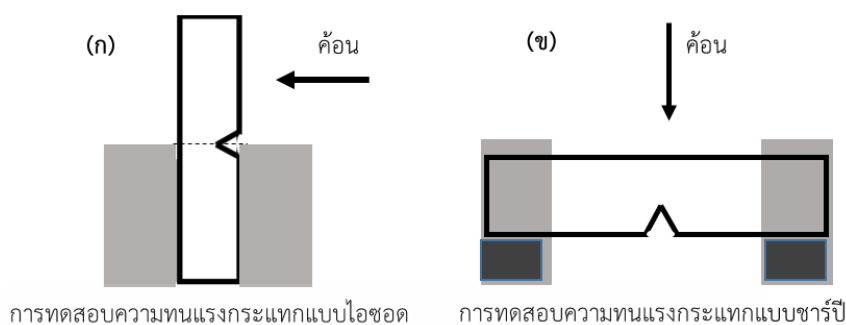


ภาพที่ 2.17 แผนภูมิวิธีการทดสอบความทนแรงกระแทก [36]

สำหรับวัสดุพลาสติกนิยมทดสอบความทนแรงกระแทก ด้วยการใช้ค้อนเหวี่ยงกระแทก (Instrumented, Pendulum Impact Test) โดยค้อนที่ใช้ทดสอบจะเป็นค้อนที่มีน้ำหนักมาตรฐาน ซึ่งจะถูกลอยจากความสูงที่กำหนด เพื่อเหวี่ยงกระแทกชิ้นทดสอบที่ถูกวางไว้บนแท่น หรือถูกยึดไว้กับหัวจับชิ้นงาน ภายหลังการกระแทกพลังงานของค้อนจะสูญเสียไปบางส่วน ซึ่งได้จากความสูงของค้อนที่ลดลงในส่วนของพลังงานที่สูญเสียไป คือพลังงานที่ชิ้นทดสอบดูดซับไปใช้ในการทำให้เกิดการแตกหักนั่นเอง ค่าความทนแรงกระแทกจะมีหน่วยเป็น นิวตัน หรือ จูล / เมตร การทดสอบความทนแรงกระแทกที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ

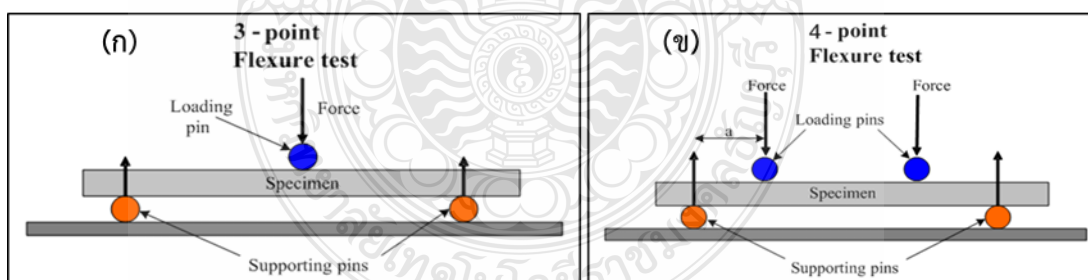
1. การทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Testing) วิธีนี้ ชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยบากจะถูกนำมาตั้งในแนวตั้ง โดยชิ้นทดสอบจะถูกยึดให้ติดกับเครื่องทางด้านล่าง และหันชิ้นทดสอบด้านที่มีรอยบากเข้าหาค้อนที่ถูกปล่อยลงมา หัวค้อนจะตีส่วนบนของชิ้นทดสอบให้แตกออก ดังภาพที่ 2.18 (ก)

2. การทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Testing) ชิ้นทดสอบของวิธีนี้มีความยาวมากกว่าวิธีแรก วิธีการทดสอบจะเริ่มจากการนำชิ้นทดสอบไปวางตามแนวนอนบนฐานรองชิ้นงานทั้ง 2 จุด โดยวางชิ้นทดสอบให้รอยบากอยู่ตรงข้ามกับค้อนที่ถูกปล่อยลงมา ดังภาพที่ 2.18 (ข)



ภาพที่ 2.18 การทดสอบความทนแรงกระแทก (ก) การทดสอบแบบไอซอด
(ข) การทดสอบแบบชาร์ปี

9) ความทนแรงดัดงอ (Flexural Strength) การทดสอบแรงดัดงอของพลาสติก เหมาะกับการทดสอบพลาสติกที่มีความแข็งเปราะ หรือพลาสติกเสริมแรง เนื่องจากแรงที่ใช้ในการคำนวณจะมีความแม่นยำสูง เมื่อพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงสภาพในระดับต่ำ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล เช่นเดียวกับการทดสอบความทนแรงดึง เพียงแต่หัวที่ใช้ทดสอบและการให้แรงกระทำแตกต่างกันเท่านั้น โดยทั่วไปการทดสอบนี้มี 2 วิธี คือ การทดสอบความทนแรงดัดงอแบบ 3 จุด (Three Point Bending) และการทดสอบความทนแรงดัดงอแบบ 4 จุด (Four Point Bending) ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การทดสอบความทนแรงดัดงอ (ก) การทดสอบการดัดงอ แบบ 2 จุด
(ข) การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด [37]

การทดสอบความทนแรงดัดงอแบบ 3 จุด มีวิธีการทดสอบคือจะนำชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาวางบนจุดรองรับ (Supports) ซึ่งมี 2 จุด จากนั้นให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานในรูปแรงกดระหว่างกึ่งกลางชิ้นงาน ส่วนการทดสอบความทนแรงดัดงอแบบ 4 จุด

จะมีเหมือนกับการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด แต่จุดที่ให้แรงกระทำ หรือแรงกดจะมี 2 จุด ซึ่งการทดสอบวิธีนี้ เหมาะกับพลาสติกที่อ่อนกว่าวิธีแรก หรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย มีความแข็งแรงน้อยกว่า

2.7.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) [38]

สมบัติทางความร้อน ความหมายโดยทั่วไปหมายถึงการตอบสนองของวัสดุที่มีต่อความร้อน เช่น การที่วัสดุสามารถดูดซับพลังงานในรูปของความร้อน และเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การหลอม การเปลี่ยนแปลงขนาดหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อน เป็นต้น สมบัติทางความร้อนที่สำคัญของพลาสติก ได้แก่

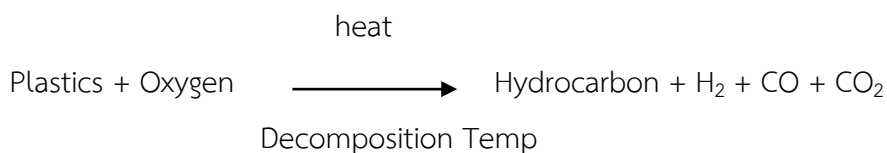
อุณหภูมิการหลอมตัว (T_m) เป็นอุณหภูมิที่พลาสติกเกิดการหลอมเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นของไหล ในอุตสาหกรรมพลาสติกมักใช้อ้างอิงถึงพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการหลอมพลาสติกเพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ หรืออุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิแก้ว (T_g) เป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกถึงสภาพการใช้งาน เช่น ถ้าพลาสติกมีอุณหภูมิแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานปกติ พลาสติกจะอยู่ในสภาพแข็ง และเปราะ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าพลาสติกมีอุณหภูมิแก้วสูงกว่าอุณหภูมิการใช้งานปกติพลาสติกจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่นเหนียว

อุณหภูมิแอ่นตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน (Heat Deflection Temperature Under Load, HDT) และอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคท (Vicat Softening Temperature) ทั้ง 2 อุณหภูมินี้จะอ้างอิงถึงอุณหภูมิสูงสุดที่พลาสติกสามารถใช้งานในรูปผลิตภัณฑ์ได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และทั้ง 2 อุณหภูมินี้จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมพลาสติกเสมอ

สมบัติการติดไฟ (Flammability) ของพลาสติก สมบัตินี้ไม่จัดเป็นสมบัติทางความร้อนของพลาสติกโดยตรง แต่มีความสำคัญต่อการเลือกใช้งานพลาสติก เนื่องจากพลาสติกแต่ละชนิดเมื่อมีการลุกติดไฟจะมีพฤติกรรมแตกต่างกัน เช่น ในกรณีของพลาสติกพีวีซี เมื่อติดไฟ เปลวไฟสามารถดับได้เอง แต่ในกรณีของพอลิเอทิลีน เมื่อติดไฟจะมีการลามไฟและเกิดการไหลหยดของเปลวไฟ เป็นต้น

เทอร์โมพลาสติกโดยทั่วไปนั้นจะลุกไหม้ได้ง่ายเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงเพียงพอ พลาสติกจะเผาไหม้โดยมีการผ่านขบวนการที่ได้รับความร้อนจนถึงขั้น Pre - Ignition เฟส หลังจากนั้นจึงติดไฟ ซึ่งจะเป็นการแตกตัวของโครงสร้างที่เป็นยาวแบบลูกโซ่ไปเป็น ไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรเจน และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานในการแยกสลายสูง และทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ซึ่งจะปล่อยความร้อนออกมาทำให้ไฟลุกลาม กระบวนการเผาไหม้



ซึ่งไฟจะติดได้ต้องมีเชื้อเพลิง ออกซิเจน และวัสดุที่ติดไฟ สารหน่วงไฟจะเป็นตัวขัดขวางการรวมตัวของสามองค์ประกอบนี้ เพื่อลดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ในทางการค้าสารหน่วงไฟจะมีส่วนผสมของโบรมีนกับคลอรีน หรือพวกที่มีฟอสฟอรัสเป็นหลัก หรือโลหะออกไซด์

กลไกการหน่วงไฟในพลาสติก จะแบ่งออกเป็น 3 แบบหลัก ๆ คือ

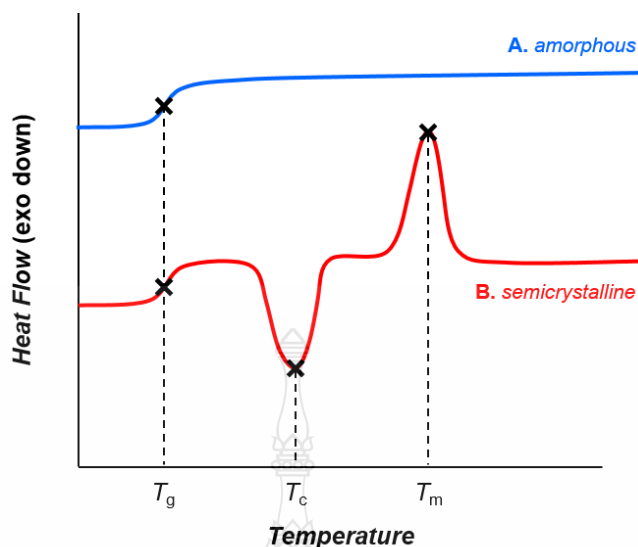
1. การยับยั้งเฟสไอในระหว่างการเผาไหม้ สารหน่วงไฟจะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ที่เผาไหม้ในเฟสไอที่รับกวนการผลิตอนุมูลอิสระในระดับโมเลกุล และยุติกระบวนการเผาไหม้

2. Solid Phase Char - Formation สารหน่วงไฟที่ก่อตัวเป็นถ่านนั้นจะทำปฏิกิริยากับชั้นคาร์บอนที่ผิวของวัสดุ ชั้นนี้ป้องกันพอลิเมอร์ทำให้ไพโรไลซิสช้าลง และสร้างเกราะป้องกันที่ขัดขวางการปล่อยก๊าซเพิ่มเติมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

3. Quench & Cool แร่ธาตุไฮดรตประกอบด้วยระบบหน่วงการติดไฟที่ปราศจากฮาโลเจนซึ่งมักใช้สำหรับการอัดรีด เช่น สายไฟและสายเคเบิล ระบบเหล่านี้ใช้ปฏิกิริยาดูดความร้อนในที่ที่มีไฟ เพื่อปล่อยโมเลกุลของน้ำที่ทำให้พอลิเมอร์เย็นตัวลง และเจือจางกระบวนการเผาไหม้

นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางความร้อนอื่น ๆ อีก เช่น Coefficient Of Linear Thermal Expansion, Brittleness Temperature เป็นต้น

1. อุณหภูมิหลอมและอุณหภูมิแก้ว (T_m , T_g) สามารถหาได้ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimeter, DSC) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ทำได้โดยการนำชิ้นทดสอบพลาสติกบรรจุ ในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึก จากนั้นนำไปทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊ส ไนโตรเจน โดยเริ่มทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิแก้วของพลาสติกแล้วจึงเริ่มให้ความร้อนที่อัตราการให้ความร้อนคงที่จนพลาสติกหลอม หากต้องการดูอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ให้เริ่มลดอุณหภูมิลงด้วยอัตราการลดลงของอุณหภูมิคงที่เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิ พลาสติกจะเริ่มเย็นตัวและกลับมาเกิดผลึกใหม่ จากนั้นดูสมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจากเทอร์โมแกรม (Thermogram) โดยบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะจะแสดงการดูดกลืน และคายความร้อน ซึ่งเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน ทำให้ทราบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g), อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c), อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m), เอนทัลปีการหลอมเหลวผลึก (Melting Enthalpy, ΔH_m) และยังสามารถคำนวณปริมาณการเกิดผลึก (Degree Of Crystallinity, X_c) ได้ด้วย ดังภาพที่ 2.20



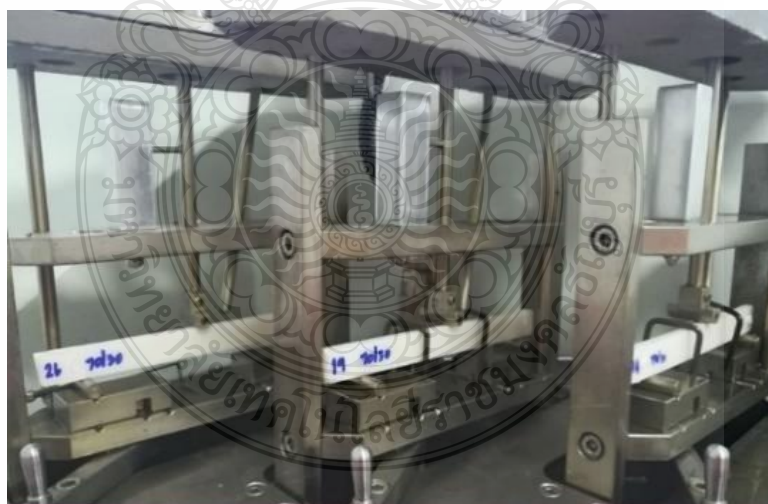
ภาพที่ 2.20 เทอร์โมแกรมแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะการดูดกลืนและคายความร้อน [38]

2. อุณหภูมิแอ่นตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน หมายถึงอุณหภูมิที่ชิ้นงานเกิดการแอ่นตัวภายใต้แรงเค้นจากใช้งาน จนเกิดการเสียเสถียรภาพทางการรับน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อนจากการใช้งานสูงขึ้นจนถึงพิกัดนั้น โดยอุณหภูมิที่ ตัวอย่างสามารถแอ่นตัวได้ที่ระยะ 0.25 มม. จะถูกรายงานเป็น Deflection Temperature หรืออุณหภูมิแอ่นตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน (HDT)

การหาค่าอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคทจะใช้เครื่องมือตัวเดียวกัน วิธีนี้จะใช้หัวกดรูปเข็มกดลงบนชิ้นทดสอบโดยมีน้ำหนักกดมาตรฐาน และเพิ่มอุณหภูมิให้ชิ้นงานอย่างต่อเนื่องจนหัวกดรูปเข็มทะลุผ่านชิ้นทดสอบเป็นระยะ 1 มิลลิเมตร จึงถือว่าสิ้นสุดการทดสอบ ภาพที่ 2.21 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิแอ่นตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนและอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคท และภาพที่ 2.22 - 2.23 แสดงลักษณะชิ้นทดสอบหัวกด และวิธีการวางชิ้นงานทดสอบของการทดสอบทั้ง 2 วิธี



ภาพที่ 2.21 เครื่องวัดอุณหภูมิแอนตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน
(Heat Distortion Temperature, HDT) CEAST 6911



ภาพที่ 2.22 การวางชิ้นทดสอบอุณหภูมิแอนตัวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน
ตามมาตรฐาน ASTM D648



ภาพที่ 2.23 ลักษณะห้กดทดสอบและการวางขึ้นทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคท ตามมาตรฐาน ASTM D1525

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประทุมมา สุโส๊ะ [39] ได้ศึกษาสมบัติของพลาสติกผสมให้มีสมบัติสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ HDPE, LDPE และ PP โดยอาศัยสมบัติของพลาสติกทั้งสามชนิด ที่เป็นพลาสติกในกลุ่มโอเลฟินส์ ที่มีไฮโดรคาร์บอนก็จะเกิดการสร้างพันธะกันเองได้ และมีการเติมสารก่อผลึกเพื่อเพิ่มความเป็นผลึกที่จะส่งผลให้สมบัติของพลาสติกดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า พลาสติกทั้งสามชนิดที่เป็นพลาสติกในกลุ่มโอเลฟินส์สามารถเกิดการสร้างพันธะกันเองได้ และมีการเติมสารก่อผลึกเพื่อเพิ่มความเป็นผลึกที่จะส่งผลให้สมบัติของพลาสติกดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่าการเลือกพลาสติกผสมระหว่าง HDPE กับ LDPE (HDPE 20 % + LDPE 80 %) เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสม โดยที่ค่าการทนต่อแรงกระแทกการทนต่อแรงดึง และค่าความแข็งมีความเหมาะสมกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น และสูตรที่ผสม PP

เจษฎินทร์ โพธิ์งาม [40] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของจำนวนครั้ง และปริมาณการใช้รีไซเคิลที่มีต่อสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยได้ทำการศึกษาจำนวนครั้งของการรีไซเคิลตั้งแต่ 1 - 4 ครั้ง ในอัตราส่วนผสมกับเม็ดใหม่ในช่วงระหว่าง 15 - 45 % โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบที่การรีไซเคิลครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า ค่าความหนืด อัตราส่วนการบวมตัว ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการที่สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัว และถูกตัดขาดในระหว่างกระบวนการผลิตซ้ำ อย่างไรก็ตาม

หากพิจารณาผลการทดสอบที่ได้จากจำนวนครั้งของการรีไซเคิลที่ 3 และ 4 พบว่าค่าความหนืด และความต้านทานต่อแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ โมเลกุลที่มีลักษณะเป็นกึ่งก้านของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่ม ปริมาณการใช้รีไซเคิล พบว่าค่าความหนืด และอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืดก่อนขาดมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ธัญวิทย์ ช่อนภู [41] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของขวดผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) (ทั้งไม่มี และมีการเคลือบผิว ด้วยกรดสเตียริก) ในปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก และมีการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA) ช่วยในการผสม โดยศึกษาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม HDPE : EVA (100 : 0, 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15 และ 80 : 20) ที่มีการผสม CaCO_3 30 % โดยน้ำหนัก และศึกษาการใช้ปริมาณ CaCO_3 (30 - 40 % โดยน้ำหนัก) การผสมสูตรทำโดยการใช้เครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปขวด ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด จากการศึกษาพบว่าขวดที่มีการใช้ CaCO_3 เกรดที่ไม่มี การเคลือบผิวให้สมบัติเชิงกลของขวดดี เนื่องจาก EVA ช่วยให้เกิดการผสมที่ดี CaCO_3 กระจายตัวดี และเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ทำให้การดึงยืด ณ จุดขาด และพลังงานแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นในระบบ HDPE : EVA : CaCO_3 พบว่า HDPE และ EVA เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible Blend) ยืนยันได้จากหลักฐานวิทยา ส่งผลให้มีอุณหภูมิในการหลอมผลึกและปริมาณ ความเป็นผลึกของ HDPE ใกล้เคียงกันทุกสูตร การเพิ่ม EVA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด มอดุลัส และความแข็งแรงกดของขวดมีค่าลดลงในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ความยืดหยุ่นของ EVA ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) พบว่า ชิ้นงานที่มี EVA ไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ และค่าพลังงานกระแทกของ ชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่ 21 จูล

พิสิฐพงศ์ ปานจ้อย [42] ศึกษาสมบัติความทนแรงกระแทก สมบัติความทนแรงดึงของ พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตระหว่างฟิล์มรีดรวม 3 ชั้นรีไซเคิล (RF) ที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยมีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โอลิโกเมอร์เป็นตัวประสาน (LDPE : LLDPE Oligomer : LLDPE) กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่ปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก จากนั้นเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต เตรียมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และ ขึ้นทดสอบด้วยการฉีก พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนไม่มีการแตกหักที่สภาวะการทดสอบ มีความทนแรงดึงใกล้เคียงกับขึ้นทดสอบฟิล์มรีไซเคิล แต่มีค่ามอดุลัสที่อัตราส่วน RF : HDPE เท่ากับ 70 : 30 % โดยน้ำหนักซึ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์มรีไซเคิล 50.9 % จึงนำสูตรนี้ไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์

คอมโพสิต ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่าขึ้นทดสอบคอมโพสิต ไม่เกิดการแตกหักที่สภาวะการทดสอบ การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในทุกอัตราส่วน ทำให้มีค่าความทนแรงดึงลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกันมาก และลดต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม (RF : HDPE) : (70 : 30) ประมาณ 11 % แต่มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 89.5 - 130 % เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม และแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอัตราส่วน RF : HDPE เท่ากับ 70 : 30 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเช่นเดียวกับร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมโพสิต พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิโค้งงอภายใต้อุณหภูมิและน้ำหนักของคอมโพสิตทุกอัตราส่วนพบว่ามีค่าเท่ากันคือ 53 °C ขึ้นทดสอบจากฟิล์มรีไซเคิลที่มีอุณหภูมิโค้งงอภายใต้อุณหภูมิ และน้ำหนักเท่ากับ 58.9 °C

Sineenart Chariyachotilert และคณะ [43] ศึกษาสมบัติของ HDPE ที่รีไซเคิลจากขวดน้ำดื่ม โดยการนำขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วมาบดผสมกับเม็ดใหม่ในอัตราส่วนเม็ดใหม่ HDPE 0 20 25 40 และ 50 % ของเม็ดรีไซเคิล ศึกษาผลของการเติม CaCO_3 ที่อัตราส่วนการเติม CaCO_3 0 10 20 และ 30 % (w/w) ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นรูปขึ้นทดสอบดัมเบลล์ ด้วยการฉีดทดสอบความหนาแน่น ความทนแรงดึง และการยึดตัว จากการศึกษพบว่าพลาสติกกรีไซเคิลมีผลทำให้สารประกอบคอมพาวด์มีค่าความหนาแน่น และค่าความทนแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ขึ้นทดสอบมีค่าการยึดตัวเพิ่มขึ้น และการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้พลาสติกผสมมีค่าความทนแรงดึง และค่าการยึดตัวลดลงตามปริมาณของ CaCO_3 ที่เพิ่มขึ้น และสรุปว่าสูตรของสารประกอบคอมพาวด์ที่มีอัตราส่วนของ HDPE รีไซเคิล 20 % และ CaCO_3 10 % เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับฉีดกระถางต้นไม้ หรือถาดอเนกประสงค์ (Multi-Purpose Trays)

Wen-Yi Wang และคณะ [44] เตรียมและศึกษานาโนคอมโพสิตระหว่าง LDPE : CaCO_3 ด้วยการหลอมผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน ศึกษากลไกการเสริมแรง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าสมบัติความทนแรงดึงและมอดุลัสการแอ่นตัว (Flexural Modulus) ของระบบนาโนคอมโพสิต ได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเติม CaCO_3 โดยอนุภาค CaCO_3 มีการกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ในระดับนาโน (Nanometer Scale) โดยกลไกการเสริมแรงของ CaCO_3 คืออนุภาคของ CaCO_3 ทำหน้าที่เป็นเฮเทอโร - นิวคลีโอ (Hetero-Nuclei) ทำให้ระดับความเป็นผลึกของเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดสอบความทนแรงดึงนาโนคอมโพสิตจึงมีค่าสูงกว่า

Moayad N. Khalaf [45] ศึกษาเกี่ยวกับการเติมสารตัวเติมอนินทรีย์และอินทรีย์ 3 ชนิด คือ ลิกนินเซลลูโลสจากปาล์ม CaCO_3 ขนาด 25 เมช และใยแก้วสั้น เตรียมเป็นสารประกอบคอมโพสิตด้วยเครื่องผสมระบบปิด ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตแต่ละชนิดที่เตรียมได้

พบว่าการใช้ลิกนินเซลลูโลสเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้ดีกว่า CaCO_3 ทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะและขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมเสริมแรง และพบว่าลิกนินเซลลูโลสมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความแข็งแรงให้แก่คอมโพสิตเมื่อเทียบกับสารตัวเติมอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

S. Suwannachot และคณะ [46] ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตระหว่างเพทรีไซเคิล : พอลิโพรพิลีน และโพลาลัสโทไนต์ การเตรียมพอลิเมอร์ผสม เตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยการฉีก การหาอัตราส่วนผสมของเพทและพอลิโพรพิลีนที่เหมาะสม เตรียมโดยการใส่พอลิเอทิลีนในเพทรีไซเคิลที่อัตราส่วน 10 - 60 % พบว่าที่การผสมพอลิโพรพิลีน 30 % ให้ค่าสมบัติความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกสูง จากนั้นจึงนำพลาสติกผสมที่อัตราส่วนนี้มาใส่ PP - g - MAH เพื่อเพิ่มสมบัติความเข้ากันได้ โดยเติมในปริมาณ 1 - 7 phb พบว่าที่ปริมาณการเติม ที่ 3 phb แสดงสมบัติความทนแรงกระแทกและยังสัณดุสสูง แล้วจึงนำพอลิเมอร์ผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) มาเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตด้วยการใส่โพลาลัสโทไนต์ในอัตราส่วน 5 wt % , 10 wt % , 15 wt % และ 20 wt % ศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของพลาสติกผสม จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของพลาสติกผสม : คอมโพสิต ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบว่าไม่เกิดฟีกใหม่ จึงเป็นการผสมทางกายภาพ และเมื่อตรวจสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) พลาสติกผสมมีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ที่สูงขึ้นประมาณ 5 - 18 °C ตามปริมาณของโพลาลัสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าโพลาลัสโทไนต์สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ และเมื่อทดสอบอุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อน (HDT) พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต แสดงผลการดัดงอที่อุณหภูมิสูงขึ้นในทุกอัตราส่วนของโพลาลัสโทไนต์ในกรณีสมบัติเชิงกล ค่าความทนแรงดึง และค่าความทนแรงกระแทกจะมีค่าสูงกว่าเพทรีไซเคิล แต่เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมค่าที่ได้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของโพลาลัสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น

Ismail Yuhaida และคณะ [47] ศึกษาผลของการใส่แร่อนินทรีย์โพลาลัสโทไนต์ ที่มีต่อสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) : ยางธรรมชาติ : โพลาลัสโทไนต์ (WS) คอมโพสิต การเตรียมคอมโพสิต HDPE : NR/WS เตรียมโดยการผสมในเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer, Brabender) ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วโรเตอร์ (Rotor Speed) 50 rpm เป็นเวลา 10 นาที ผลการทดสอบ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโพลาลัสโทไนต์ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่ายังสัณดุสของ HDPE/NR/WS คอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใส่ปริมาณของโพลาลัสโทไนต์เพิ่มขึ้น

วรรณัฐ เรืองโกสุม [48] ได้ศึกษาถึงวิธีการเตรียมนาโนคอมโพสิต High - Density Polyethylene (HDPE) และ Montmorillonite ที่ผ่านการปรับปรุงด้วย Swelling Agent ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ด้วยวิธีการใช้สารละลายและวิธีการหลอมเหลว และทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสม เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ทั้งเชิงกลและทางความร้อนของ HDPE พบว่าการเตรียมนาโนคอมโพสิตด้วยวิธีการหลอมเหลวของ PE : o - OMMT Nanocomposites สามารถทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นซิลิเกตได้ดีที่สุดเนื่องจากผลของการปรับปรุงคุณสมบัติของ o - OMMT และพอลิเมอร์จะต้องผ่านแรง Shear ของเครื่องจักรหลายเครื่องในขณะที่การเตรียมด้วยวิธีการใช้สารละลายมีลักษณะการซ้อนทับกันของชั้นซิลิเกต และมีบางส่วนที่เกิดการเกาะกลุ่มเรียงซ้อนกันกระจายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของ Sweling Agent ในระหว่างชั้น Clay นอกจากนี้ทำให้สมบัติทางความร้อนเสียไปด้วย สำหรับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ พบว่าค่า Young's Modulus ของ Nanocomposites ที่เตรียมด้วยวิธีการต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นปริมาณ OMMT ที่เติมลงไป ในขณะที่ค่า Tensile Strength และ Percent Elongation มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ อาจเกิดจากการเพิ่มปริมาณของ OMMT มากขึ้นนั้น ทำให้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์โดยการที่ปริมาณของ OMMT เพิ่มมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ผ่านกันของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ยากลำบากมาก นอกจากนี้ยังทำให้เกิดเป็นจุดรวมแรง (Stress Concentration) ในชิ้นงานความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุ (Impact Testing) มีค่าลดลง เนื่องจากการให้แรงกระแทกอย่างทันทีทันใดแก่ชิ้นงาน เนื่องจากผลจากการเกิด Stress Concentration ทำให้ถูกขัดขวางโดยเคลือบที่แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของโมเลกุล ส่งผลให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานได้ง่ายมากขึ้น นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ความแข็งของผิวหน้าวัสดุ (Hardness Testing) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น

M. K. Chang และคณะ [49] ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรง และเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกราฟมาเลอิกแอนไฮไดร : มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมโพสิต โดยเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ : มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมโพสิต โดยใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วน 0 1 2 3 4 และ 5 wt % เท่ากันทั้ง 2 ตัวอย่างผสมด้วยกระบวนการหลอมผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ พบว่าค่ามอดูลัสของ LDPE : MMT มีค่าสูงกว่า Pure LDPE 51.25 % และ LDPE - g - MA/MMT มีค่าสูงกว่า Pure LDPE 62.1 % การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงกระแทกของ LDPE - g - MA/MMT มีค่าสูงกว่า LDPE : MMT สมบัติการดัดงอ พบว่าการเติม MMT 5 % ใน LDPE - g - MA มีอัตราการต้านทานการดัดงอเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด (เพิ่มขึ้น 8.5 % Rigidity) และค่าความแข็ง (Hardness) พบว่า LDPE - g - MA ที่ใส่ MMT มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สมบัติทางความร้อนพบว่าคอมโพสิตของ LDPE-g-MA : MMT มีค่า (T_m) ต่ำกว่า LDPE : MMT เล็กน้อย และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c)

ของ LDPE – g – MA : MMT มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อใส่ MMT 1 % ในขณะที่ระบบคอมโพสิต LDPE : MMT อุณหภูมิการเกิดผลึกสูงสุดเมื่อใส่ MMT 2 % ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของ LDPE – g – MA มีโครงสร้างที่ต่างกันมากกว่า LDPE : MMT ดังนั้นการกระจายตัวของ MMT จึงเกิดได้ง่ายกว่า และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างของ LDPE – g – MA อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต พบปรากฏการณ์การเกาะกลุ่มของ MMT และการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อปริมาณ MMT เพิ่มขึ้น



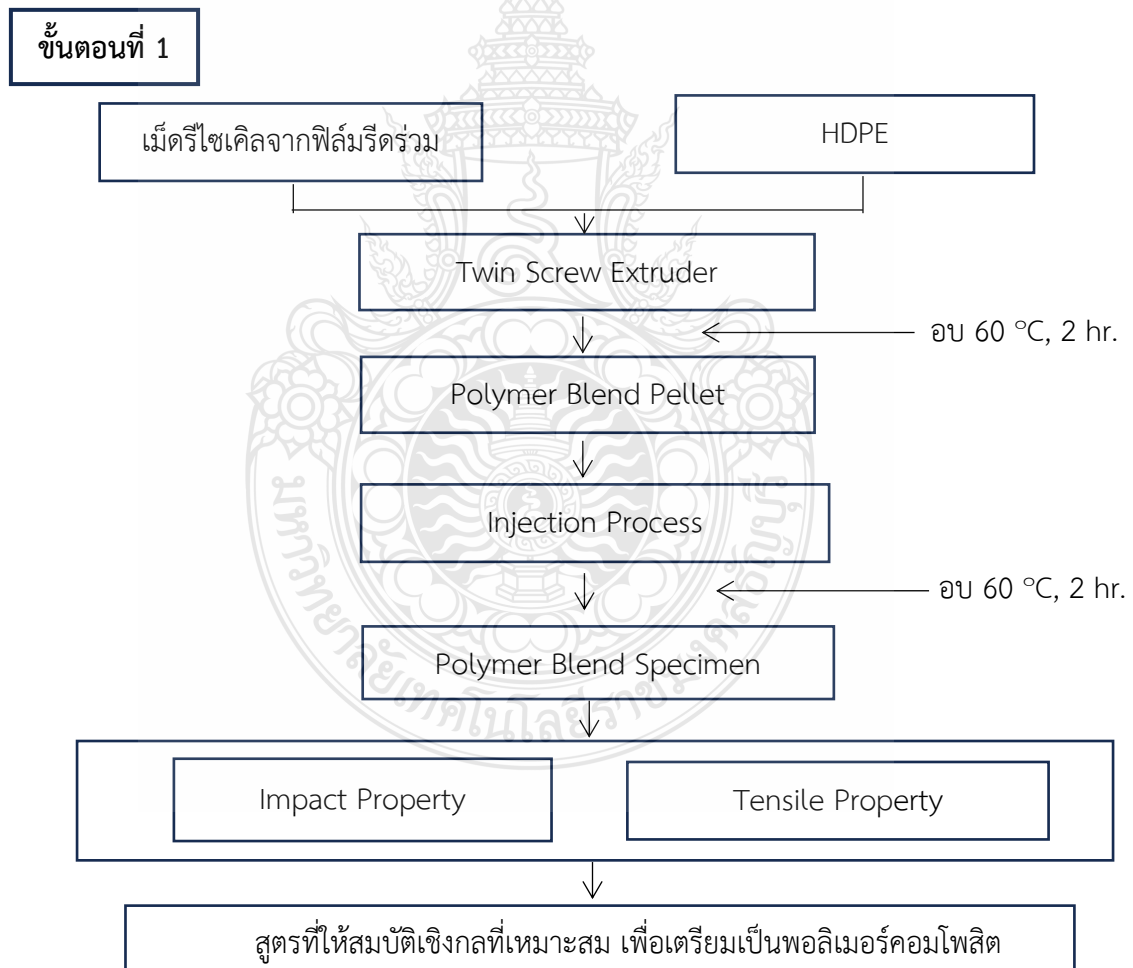
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

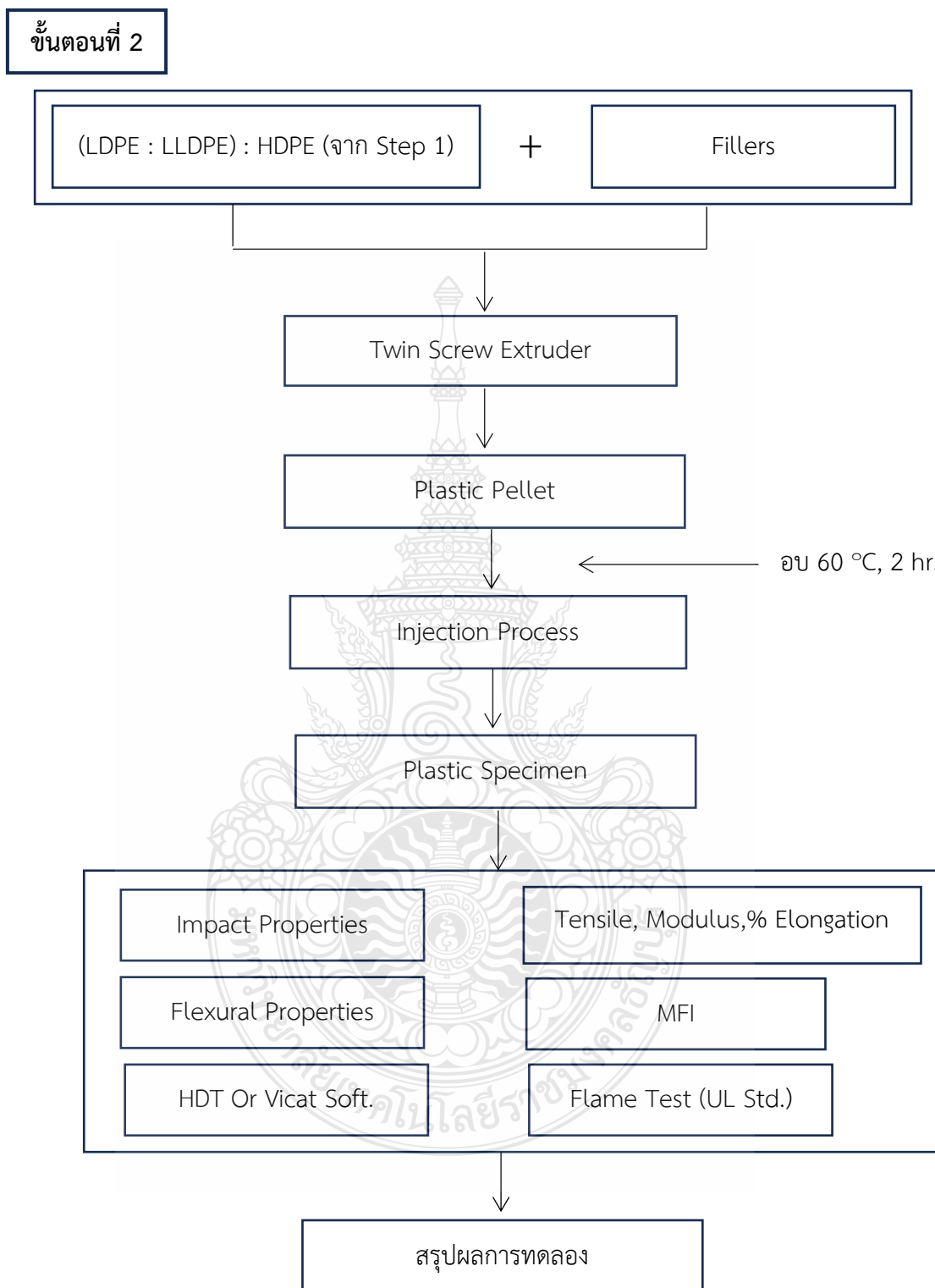
วิจัยนี้ มีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลของฟิล์มรีดรวม LDPE : LLDPE กับ HDPE และเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต ระหว่างฟิล์มรีดรวม (LDPE : LLDPE) รีไซเคิลกับ HDPE ที่มีการเติมสารตัวเติมแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โวลลาสโทไนต์ และ มอนต์มอริลโลไนต์ โดยมีแผนการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนของการทำงานและระยะเวลาการทำงาน มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิแสดงวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเม็ดพลาสติกฟิล์มรีดรวมรีไซเคิล :
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและการทดสอบสมบัติ



ภาพที่ 3.2 แผนภูมิแสดงวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตจากเม็ดพลาสติกฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล : พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง : สารตัวเติมและการทดสอบสมบัติ

3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

3.2.1 เม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากฟิล์มผสมรีดร่วม LDPE : LLDPE โดยมีอัตราส่วนผสมโดยประมาณ LDPE 80 % โดยน้ำหนัก และ LLDPE 20 % โดยน้ำหนัก ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไซก้าคอร์ปอเรชั่นจำกัด ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากฟิล์มผสมรีดร่วม LDPE : LLDPE

3.2.2 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ชื่อทางการค้า InnoPlus HD6200B บริษัท PTT Marketing Company จำกัด ประเทศไทย ดังภาพที่ 3.4 และมีสมบัติตามตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.4 เม็ดพลาสติก HDPE (InnoPlus HD6200B)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเม็ดพลาสติก HDPE (InnoPlus HD6200B)

Properties	Unit	Test Method	Value
Melt Flow Rate (190 °C, 2.16 Kg)	g/10min	ASTM D 1238	0.45
Density	g/cm ³	ASTM D1505	0.962
Vicat Softening Point @ 10 N 50 °C/hr	°C	ASTM D1525	125
Tensile Strength @Yield	Kg/cm ²	ASTM D638	330
Elongation @ Break	%	ASTM D638	1000
Stiffness	Kg/cm ²	ASTM D747	10000
Notched Izod Impact Strength	Kg.cm/cm	ASTM D256	12 (P*)

(P*) = Partial Break

3.2.3 ผงแคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการสังเคราะห์ ชื่อทางการค้า CaCO₃ (C6763)
บริษัท Merck จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสมบัติทั่วไปตามตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.2 สมบัติของ CaCO₃ (C6763)

Properties	
Type	Synthesis CaCO ₃
Assay	≥ 99 % (EDTA Titration)
From	Fine powder
Color	White
pH	8
Density	2.93 g/mL at 25 °C

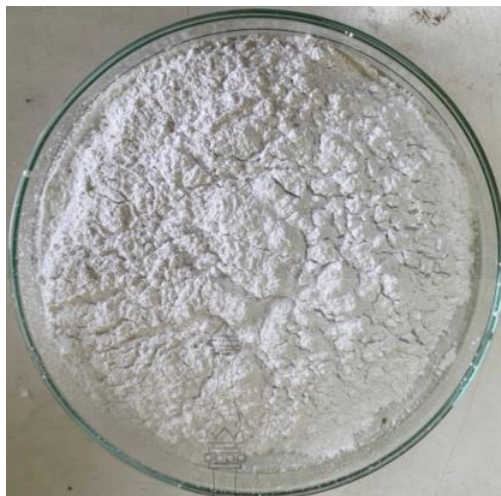


ภาพที่ 3.5 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3 (C6763)

3.2.4 แร่วอลลาสโทไนต์ ขนาดอนุภาค 2000 เมช ชื่อทางการค้า Wollastonite XYNFW - SW แสดงในภาพที่ 3.6 สมบัติของวอลลาสโทไนต์แสดงในตารางที่ 3.3 จากบริษัท Pacific Comma Trading CO., Ltd ประเทศจีน ได้รับความอนุเคราะห์จากรองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

ตารางที่ 3.3 สมบัติของแร่วอลลาสโทไนต์ (Wollastonite XYNFW - SW) (1) องค์ประกอบทางเคมี
(2) สมบัติทางฟิสิกส์

(1) Chemical Name : CaSiO_3		(2) Physical Index	
CaO	43-46 %	Molecular Weight	116
SiO_2	50-52 %	Refractive Index	1.63
Fe_2O_3	≤ 0.35 %	Melting Point (0°C)	1480
Al_2O_3	≤ 0.4 %	PH	8.9-9.7
MgO	≤ 2.0 %	Whiteness	≥ 90 %
TiO_2	≤ 0.02 %	Aspect Ratio (L/D)	10-20
S	≤ 0.02 %	Appearance/Morphology	White/Acicular
P	≤ 0.007 %	Absorption Oil Value	20-26
L.O.I	≤ 3.5 %		



ภาพที่ 3.6 แร่โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite XYNFW - SW)

3.2.5 มอนต์มอริลโลไนต์ชนิดไม่ผ่านการตัดแปร ขนาดอนุภาคละเอียดระดับไมโครเมตร
ชื่อทางการค้า Montmorillonite Clay จากบริษัท SANNO CO., Ltd ประเทศจีน ดังแสดง
ในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย

3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม/คอมโพสิตและชิ้นงานทดสอบ ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมชิ้นทดสอบ โดยใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

1) เครื่องซัง รุ่น QHW 6R (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

2) เครื่องอบพลาสติก ชื่อรุ่นทางการค้า BINDER FD115 บริษัท Merck KGaA ประเทศเยอรมัน (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่หมุนทิศทางเดียวกัน (Co-Rotating - Screw Extruder) ชื่อทางการค้า Brabender CTE D02L800 ประเทศไทย ที่มีอัตราส่วนความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Screw Length/Screw Diameter, L/D) = 32 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูเท่ากับ 15.7 มิลลิเมตร (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

4) เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine) ชื่อรุ่นทางการค้า Arburg Allrounder 470 C Golden Edition ขนาดแรงปิดแม่พิมพ์ 150 ตัน (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้มีเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ พอลิเมอร์ผสม/คอมโพสิต โดยใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

1) เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact Tester) ชื่อรุ่นทางการค้า Ceast 9709 ประเทศอิตาลี (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

2) เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) ชื่อรุ่นทางการค้า Hounsfield H 50 K ประเทศอังกฤษ (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3) เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (Heat Distortion Temperature, HDT) และอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (Vicat Softening Temperature, VST) ชื่อรุ่นทางการค้า HDT Vicat 6911, Ceast ประเทศอิตาลี (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

4) เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Indexer) ชื่อรุ่นทางการค้า CEAST (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

5) เครื่องทดสอบการลามไฟ (Flammability Tester) ชื่อรุ่นทางการค้า CEAST ประเทศอิตาลี (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

6) เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

7) เครื่องทำรอยบาก ยี่ห้อ CEAST รุ่น 6525 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต ดังแสดงวิธีการดำเนินงานในภาพที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ และตารางที่ 3.4 และ 3.5 แสดงอัตราส่วนขององค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตตามลำดับขั้นตอน

3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ด้วยอัตราส่วนการผสมเม็ดพลาสติกจากฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล (LDPE : LLDPE, RF) กับ HDPE

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนการผสมเม็ดพลาสติกจากฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล (LDPE : LLDPE, RF) กับ HDPE

สูตร	RF (wt %)	HDPE (wt %)
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	0	100

เลือกอัตราส่วนผสมที่แสดงสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเพื่อนำไปเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตในขั้นตอนต่อไป

3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ด้วยอัตราส่วนการผสมเม็ดพลาสติกจากฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล RF : HDPE : Fillers

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนการผสมเม็ดพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE : Fillers

สูตร	RF : HDPE Blend (wt %)	CaCO ₃ (wt %)	WLT (wt %)	MMT (wt %)
6	90	10	-	-
7	80	20	-	-
8	70	30	-	-
9	90	-	10	-
10	80	-	20	-
11	70	-	30	-
12	99	-	-	1
13	97	-	-	3
14	95	-	-	5
15	90	-	-	10
16	80	-	-	20
17	70	-	-	30

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากฟิล์มรีดร่วม (LDPE : LLDPE) กับ HDPE นำเม็ดพลาสติกรีไซเคิลผสมกับเม็ดพลาสติก HDPE (เม็ดใหม่) ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.5 จากนั้นนำมาผสมด้วยให้เข้ากันด้วยการเหวี่ยงผสมเป็นเวลา 5 นาที นำไปอบไล่ความชื้นที่ตกค้างที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดสกรูหมุนทิศทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ 3.8 พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง (Extrudate) ถูกดึงผ่านน้ำเพื่อทำให้เย็นตัว (Cooling) แล้วทำการตัดเป็นเม็ด (Pellet) ได้เม็ดพลาสติกผสมรูปทรงกระบอกตามภาพที่ 3.9 ตารางที่ 3.6 แสดงอุณหภูมิและสถานะของการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ตารางที่ 3.6 อุณหภูมิและสภาวะของการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

โซนป้อน (Feed Zone)	190 °C
โซนอัด (Compression Zone)	200 °C
โซนหลอม (Metering Zone)	210 °C
โซนตายน์ (Die Zone)	220 °C
ความเร็วรอบสกรู	60 รอบ/นาที



ภาพที่ 3.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว (CTE-D02L800)



ภาพที่ 3.9 เม็ดพอลิเมอร์ผสมจากฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล (LDPE : LLDPE) : HDPE

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาอบไล่ความชื้นอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการฉีด (ภาพที่ 3.10) โดยใช้อุณหภูมิและสภาวะของการฉีดขึ้นทดสอบของเครื่องฉีดพลาสติกตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 อุณหภูมิและสภาวะของการฉีดขึ้นททดสอบของเครื่องฉีดพลาสติก

โซนป้อน (Feed Zone)	190 °C
โซนอัด 1 (Compression Zone 1)	215 °C
โซนอัด 2 (Compression Zone 2)	230 °C
โซนหลอม (Metering Zone)	240 °C
โซนหัวฉีด (Nozzle Zone)	240 °C
ความเร็วในการฉีด (Injection Speed)	20 cm ³ /s
แรงดันฉีด (Injection Pressure)	1200 bar



ภาพที่ 3.10 เครื่องฉีดพลาสติก Arburg Allrounder 470 C Golden Edition

3.5.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตนั้น ทำโดยการนำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่แสดงสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม (ข้อ 3.5.1) มาผสมกับสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ (แคลเซียมคาร์บอเนต โพลลาสโตนีต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดไม่ผ่านการดัดแปร) ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.5 ผสมโดยการเหวี่ยงผสมเป็นเวลา 5 นาที อบไล่ความชื้นตกค้างที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทิศทางเดียวกันดึงเส้นพอลิเมอร์คอมโพสิตผ่านน้ำ และทำการตัดเป็นเม็ดเช่นเดียวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมแล้วจึงนำมาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำเม็ดตัดพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้มาฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ และชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแม่พิมพ์ โดยใช้อุณหภูมิและสภาวะของการหลอมผสม และการฉีดแบบตามตารางที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

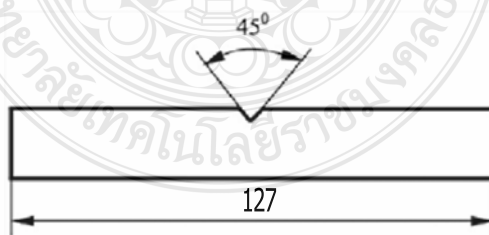
3.6 วิธีการทดสอบ

3.6.1 การทดสอบความทนแรงกระแทก

การทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Type) มีวิธีการคือเตรียมชิ้นทดสอบที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปให้มีขนาดเท่ากับ $12.7 \times 127 \times 3.17$ มม. (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) ขัดบริเวณขอบด้วยกระดาษทรายละเอียดเพื่อให้ขอบมีความเรียบ นำชิ้นทดสอบไปบากด้วยเครื่องบากขึ้นงานเป็นรูปตัว V โดยให้รอยบากทำมุม 45° ความลึกรอยบาก 2.54 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D256 เก็บชิ้นทดสอบไว้ในห้องทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดภายในชิ้นงาน แล้วจึงนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี จากภาพที่ 3.11 แสดงชิ้นทดสอบที่ทำการบากแล้ว ภาพที่ 3.12 แสดงเครื่องบากขึ้นงาน และเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิห้องทดสอบ ($25 \pm 3^\circ\text{C}$) โดยใช้น้ำหนักค้อน 4 จูล โดยยึดชิ้นทดสอบให้แน่นกับหัวจับในแนวตั้ง หันด้านรอยบากให้เข้าหาด้านหัวค้อน ยกค้อนให้สูงตามตำแหน่งที่ล็อกค่าไว้ ปลดปล่อยค้อนลงกระแทกชิ้นทดสอบให้หัก แล้วนำค่าพลังงานที่ทำให้พลาสติกแตกหักมาคำนวณค่าความทนแรงกระแทก ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Impact Strength (J/m)} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Width (m)}} \quad (3.1)$$

โดย Energy = พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก (จูล)
Width = กว้างของชิ้นงาน (เมตร)



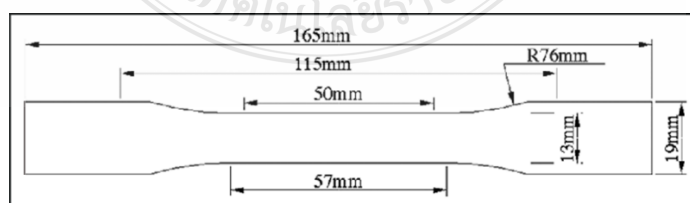
ภาพที่ 3.11 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี [43]



ภาพที่ 3.12 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Ceast)

3.6.2 การทดสอบความทนแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการยืดตัว

นำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ที่เตรียมได้จากการฉีดดังแสดงในภาพที่ 3.13 เก็บไว้ในห้องทดสอบ 24 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดของชิ้นงาน ก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล (Hounsfield H 50 KS) (ภาพที่ 3.14) ภายใต้สภาวะการทดสอบคือระยะดึง (Gauge Length) 50 มิลลิเมตร ขนาดของ Load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน อัตราการยืดคงที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตร / นาที อุณหภูมิการทดสอบ $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (Tensile Strength) ยังส์มอดุลัส (Young's Modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation At Break)



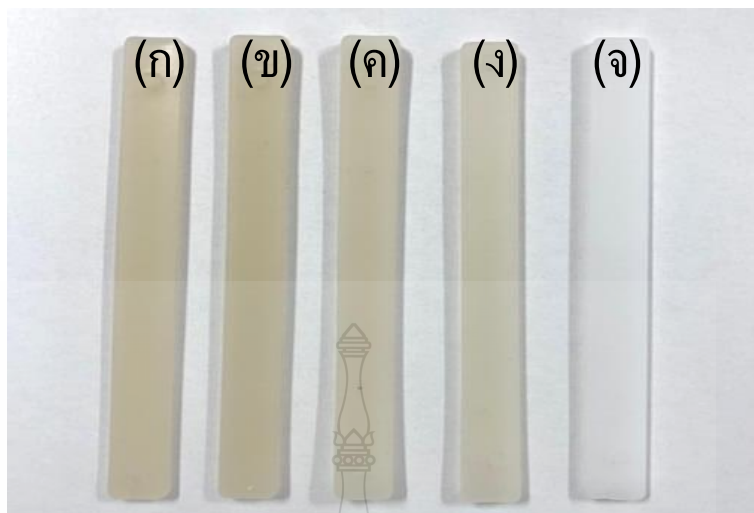
ภาพที่ 3.13 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึงรูปดัมเบลล์ [44]



ภาพที่ 3.14 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Hounsfield H 50 KS)

3.6.3 การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (HDT)

ทำการทดสอบโดยเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด $13.0 \times 127.0 \times 3.0$ มิลลิเมตร (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) ดังภาพที่ 3.15 แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาทดสอบโดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบแต่ละสูตรจำนวน 3 ชิ้น วางบนแท่นวางชิ้นงานแล้วทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D648 โดยให้แรงเค้นกับชิ้นงานเท่ากับ 1.82 MPa และใช้ Silicone Oil เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนสู่ชิ้นงานให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 2 ± 0.2 °C/min บันทึกค่าอุณหภูมิที่ชิ้นงานทดสอบแอ่นตัวลงไปเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับเวลา และผลของการทดสอบสามารถหาอุณหภูมิที่ชิ้นทดสอบแอ่นตัวถึงระยะทดสอบที่กำหนดได้



ภาพที่ 3.15 ชิ้นงานทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D648

(ก) พิล์มรีไซเคิล (RF) (ข) (RF : HDPE) (90 : 10) (ค) (RF : HDPE) (80 : 20)

(ง) (RF : HDPE) (70 : 30) และ (จ) HDPE



ภาพที่ 3.16 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการดัดงอจากความร้อน (Heat Distortion Temperature, HDT) CEAST 6911

3.6.4 การทดสอบค่าดัชนีการไหล (MFI)

ทดสอบโดยการนำเม็ดพลาสติกคอมโพสิตที่มีขนาดใกล้เคียงกันมาชั่งน้ำหนักปริมาณ 8 กรัม เลือกอุณหภูมิ และน้ำหนักกดให้เหมาะสมกับเงื่อนไข (190 °C, 2.160 kg) นำเม็ดพลาสติกที่เตรียมไว้ค่อย ๆ ใส่ลงไปใน Cylinder นำ Piston มาวางบน Cylinder ประคอง Piston ไว้ไม่ให้ล้ม เมื่อรอยขีดด้านล่างของ Piston อยู่ใน Cylinder ให้เริ่มจับเวลา และเอาน้ำหนักวางบน Piston จากนั้นเริ่มเก็บตัวอย่าง โดยจับเวลาการไหลออกของ Extruder แต่ละชิ้นที่ 60 วินาที นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าดัชนีการไหล (MFI)



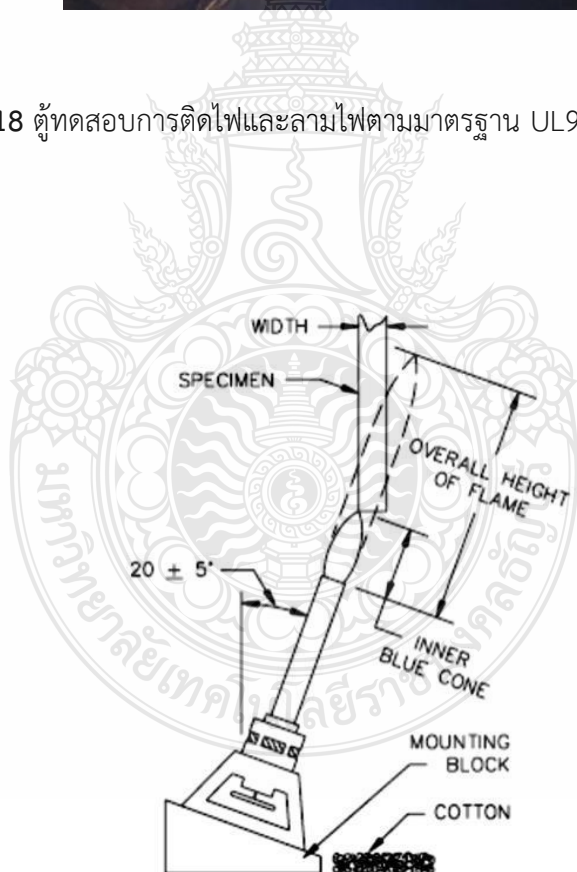
ภาพที่ 3.17 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (MFI)

3.6.5 การทดสอบการลุกไหม้และลามไฟ

เตรียมตัวอย่างทดสอบให้ได้ขนาด 13 x 127 x 3 มม. (กว้าง x ยาว x สูง) จำนวน 5 ชิ้น วางบนแท่นวางชิ้นงานในตู้ทดสอบการติดไฟและการลามไฟ (ภาพที่ 3.18) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน UL94 ในแนวตั้ง (Vertical Burning Test : VB) (ภาพที่ 3.19) ชิ้นงานทดสอบจะถูกติดตั้งด้วยแกนยาวในแนวตั้ง ฐานเปลวไฟทำมุม 20 องศา ทำการจุดไฟเป็นเวลา 5 วินาที



ภาพที่ 3.18 ตู้ทดสอบการติดไฟและลามไฟตามมาตรฐาน UL94 ทดสอบแนวตั้ง



ภาพที่ 3.19 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบการติดไฟและลามไฟ [44]

3.6.6 การทดสอบความทนแรงดัด

เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด 13.0 x 127.0 x 3.0 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x หนา) จำนวน 5 ชิ้น เพื่อความแม่นยำถูกต้องระยะห่างครกที่จะอยู่กับผลการคำนวณ Flexural Fixtures ต้องใช้เครื่องมือกำหนดตำแหน่ง เพื่อยืนยันความถูกต้องของระยะห่างการคำนวณค่าของการกำหนดระยะห่าง ดังสมการที่ 3.2

$$R = ZL^2/6d$$

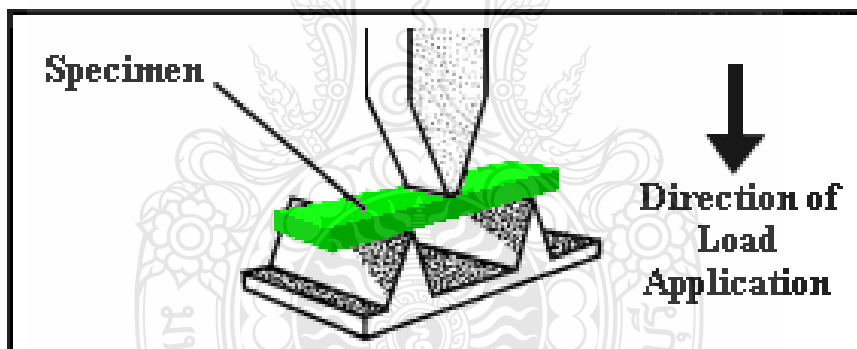
โดย

R = อัตราส่วนการเคลื่อนไหว (mm/mm)

L = ความกว้างของชิ้นงาน (mm)

D = ความลึกของชิ้นงาน (mm)

Z = อัตราแรงกดภายในไฟเบอร์ (mm/mm/min) : Z ควรจะมีค่าเท่ากับ 0.9



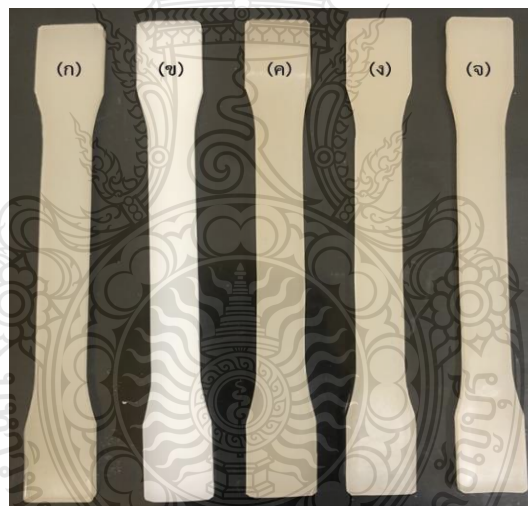
ภาพที่ 3.20 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบความทนแรงดัด [45]

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลของฟิล์มรีดร่วม LDPE : LLDPE กับ HDPE และเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต โดยเติมสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โวลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ จากนั้นนำมาศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต ได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบจากฟิล์มรีไซเคิล (RF) HDPE และ พอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 4.1 ชิ้นทดสอบ (ก) ฟิล์มรีไซเคิล (RF), (ข) HDPE, (ค) (RF:HDPE) (90:10), (ง) (RF:HDPE) (80:20) และ (จ) (RF:HDPE) (70:30)

จากภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบ RF HDPE และ RF : HDPE ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ เป็นชิ้นทดสอบที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และผ่านขั้นตอนการเย็นตัวด้วยการนำไปดิ่งผ่านน้ำ นำไปตัดเป็นเม็ดยูทรวงกระบอก และขึ้นเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีด พบว่าชิ้นทดสอบฟิล์มรีไซเคิลมีลักษณะค่อนข้างทึบแสง สีเหลืองนวล ซึ่งแตกต่างจากวัตถุดิบเริ่มต้นซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มบางใส และมีความเหนียวสูง ชิ้นทดสอบ HDPE มีลักษณะ

สีขาวขุ่น ทึบแสง มันเงา ส่วนชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE ที่ใส่ HDPE ทุกอัตราส่วนผสม เมื่อพิจารณา พบว่ามีสีสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นไม่พบการแยกเฟส (Phase Separation) และการแยกชั้น (Delamination) การใส่ HDPE ลงในพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณน้อย (10 %) พบว่าชั้นทดสอบมีสีเหลืองนวลทึบแสง แต่เมื่อใส่ HDPE ในปริมาณที่มากขึ้นเป็น 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าชั้นทดสอบมีสีอ่อนลง (ขาวขึ้น) ตามปริมาณของ HDPE ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก HDPE มีสีขาวขุ่น จะไปดบังหรือเจือจางสีเหลืองนวลของ RF จึงทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีสีอ่อนลง

4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มรีไซเคิล (RF) HDPE และพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE

สมบัติเชิงกลของฟิล์มรีไซเคิล HDPE และพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE แสดงตารางที่ 4.1 ประกอบด้วย ค่าความทนแรงกระแทก (IS) ความทนแรงดึง (TS) ยังสัมมอดูลัส และ % การยืดตัว ณ จุดขาด ชั้นทดสอบ RF HDPE และพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE ที่อัตราส่วนการใส่ HDPE 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มรีไซเคิล HDPE และ RF : HDPE

RF/HDPE (wt % : wt %)	IS (J/m)	TS (MPa)	M (MPa)	EB (%)
100 : 0	No Break	15.5 ± 0.3	276.2 ± 7.5	403.0 ± 10.1
0 : 100	53.94	29.4 ± 0.4	946.0 ± 7.5	28.3 ± 1.4
90 : 10	No Break	16.2 ± 0.4	338.8 ± 7.8	404.8 ± 5.0
80 : 20	No Break	16.6 ± 0.7	370.8 ± 20.8	409.0 ± 7.1
70 : 30	No Break	16.3 ± 0.3	417.0 ± 27.0	409.8 ± 9.0

โดยที่ IS หมายถึง Impact Strength
 TS หมายถึง Tensile Strength
 M หมายถึง Yong's Modulus
 EB หมายถึง Elongation At Break

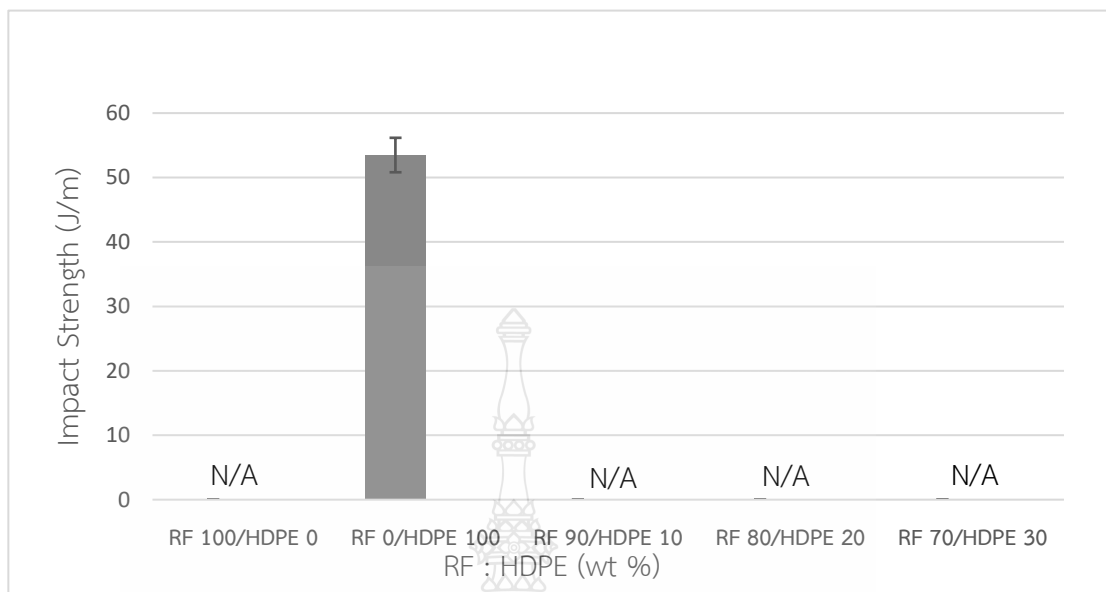
4.2.1 ความทนแรงกระแทก

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6110 (Charpy Impact) น้ำหนักตกกระทบ (ค้อน) 4 จูล และจากภาพที่ 4.2 แสดงชั้นทดสอบความทนแรงกระแทก

พบว่าฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลและพอลิเมอร์ผสมไม่เกิดการแตกหักในสภาวะการทดสอบ ขณะที่ HDPE มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 53.94 J/m ซึ่งแสดงว่าฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลมีค่าความทนแรงกระแทกสูง หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นวัสดุที่มีความเหนียวสูงและสูงกว่า HDPE ทั้งนี้ เนื่องจากฟิล์มรีไซเคิลมีองค์ประกอบของ LDPE และ LLDPE ที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายและมีปลายสายโซ่โมเลกุลมาก และเนื่องจากมีบริเวณปลายสายโซ่โมเลกุลมากจึงคลายความเค้นได้ดี ส่วน HDPE เกิดการแตกหัก เป็นเพราะมีการจัดเรียงโมเลกุลผลึกสูงกว่าและมีการยึดหยุ่นของพันธะ C-C (C-C Stretching) ภายในโมเลกุลต่ำกว่าฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล ดังนั้นจึงแสดงพฤติกรรมความเปราะกว่า และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ HDPE ในปริมาณ 10 - 30 % โดยน้ำหนัก และพบว่าไม่มีการแตกหักที่สภาวะการทดสอบเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าความเป็นผลึกของ HDPE ส่งผลรบกวนความทนแรงกระแทกของฟิล์มรีไซเคิลเพียงเล็กน้อย ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมจึงมีความเหนียวสูง



ภาพที่ 4.2 ชั้นทดสอบความทนแรงกระแทกของฟิล์มรีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิล/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

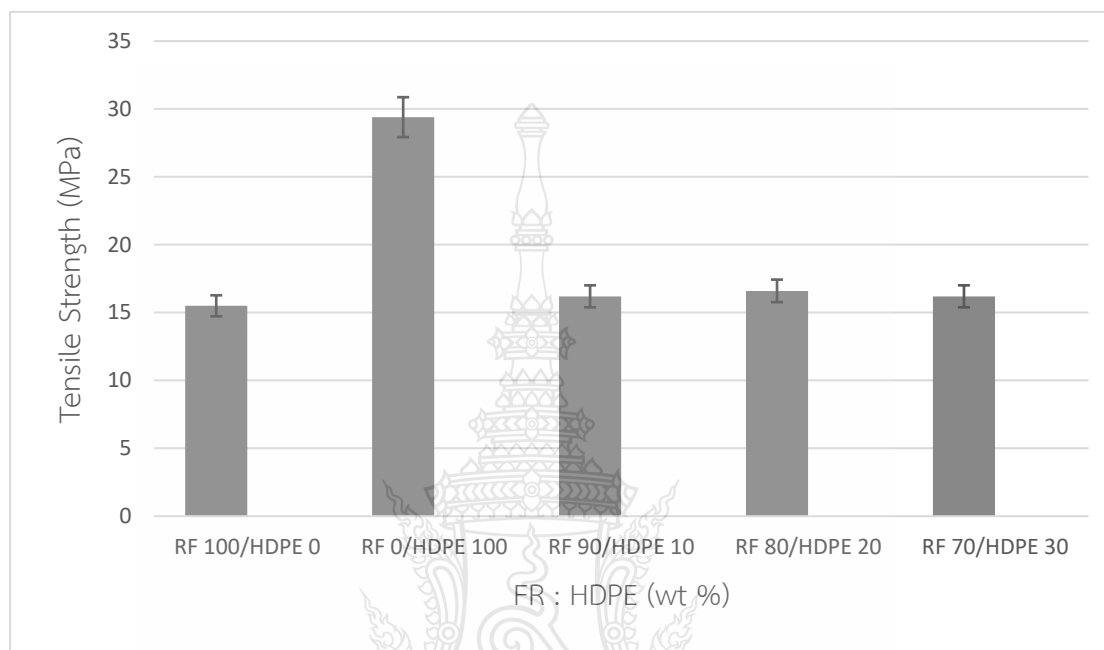


ภาพที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิล : พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

4.2.2 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.4 แสดงค่าความทนแรงดึงของฟิล์มผสม LDPE : LLDPE พบว่ามีค่าเท่ากับ 15.5 MPa และค่าความทนแรงดึงของ HDPE มีค่าเท่ากับ 29.4 MPa ซึ่งสูงกว่าขั้นตอนทดสอบฟิล์มรีไซเคิล 47.2 % ฟิล์มรีไซเคิลแสดงพฤติกรรมการยืดตัวเมื่อได้รับแรงดึงก่อนเกิดการครากแบบถาวรต่ำกว่า HDPE ทั้งนี้เนื่องจาก HDPE ที่มีความเป็นผลึกสูงกว่าสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่มีความเป็นระเบียบ มีความสามารถในการต้านแรงกระทำในทิศทางแรงดึงได้สูงกว่าและพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่ HDPE 10 - 30 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าความทนแรงดึงสูงกว่าฟิล์มรีไซเคิลเล็กน้อยประมาณ 4.5 - 7.0 % โดยพบว่ามีค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 80 : 20 % โดยน้ำหนัก (16.6 MPa) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่ HDPE ในปริมาณ 10 - 30 % โดยน้ำหนัก ส่งผลกระทบต่อสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มรีไซเคิลน้อยมาก อย่างไรก็ตามการที่ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มรีไซเคิลมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เป็นผลมาจากโครงสร้างผลึกของ HDPE ในพอลิเมอร์ผสมมีการขัดขวางการเคลื่อนไหวยของโครงสร้างโดยรวม ซึ่งตรงกับทฤษฎีพอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกกึ่งผลึก ดังนั้นการที่มีกิ่งสาขาในโครงสร้างสายโซ่มากจะลดความสามารถในการเกิดผลึก ซึ่งมีผลไปถึงความหนาแน่นและสมบัติอื่น ๆ จึงทำให้พอลิเอทิลีนมีสมบัติแตกต่างกันโดยพอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขามากจะมีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว ความแข็งดึง ความแข็งของพื้นผิว (Surface Hardness) และ

จุดอ่อนตัว (Softening Point) ต่ำ [3] โครงสร้างผลึกของ HDPE ทำหน้าที่เหมือน “โครงตาข่ายแข็ง” ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง แต่ก็ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมแข็งแรงขึ้น แต่เคลื่อนตัวและยืดหยุ่นได้ยากลง

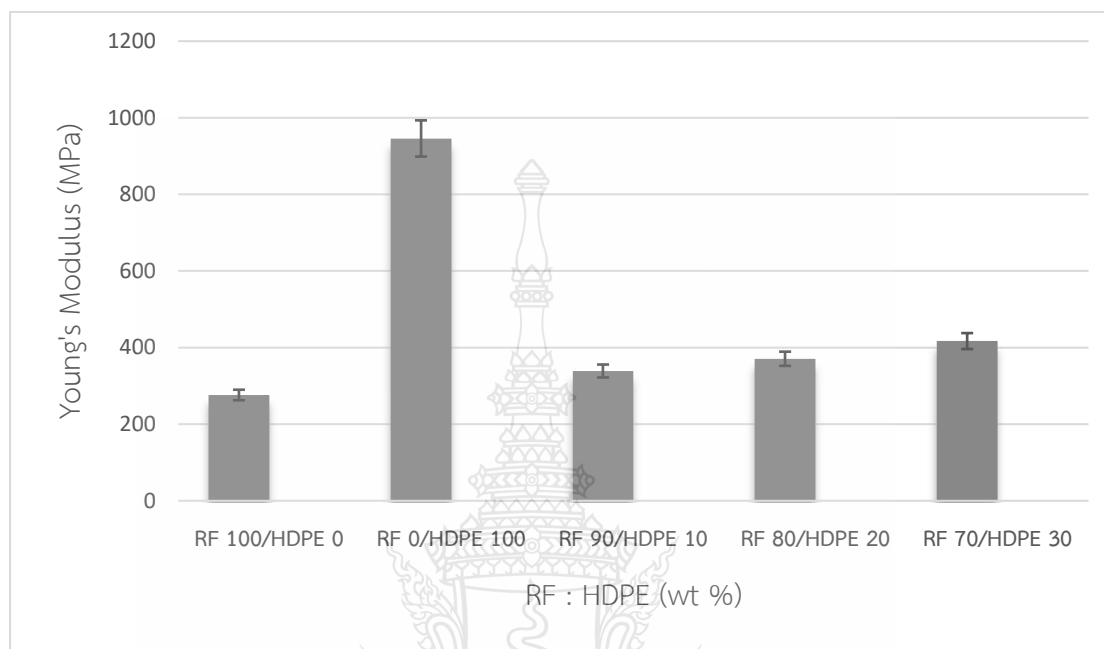


ภาพที่ 4.4 ความทนแรงดึงของฟิล์มรีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิล : พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

4.2.3 มอดุลัส

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.5 แสดงค่าของยังส์มอดุลัส พบว่าชิ้นทดสอบฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล มีค่ามอดุลัสเท่ากับ 276.2 MPa และชิ้นทดสอบ HDPE มีค่ามอดุลัสเท่ากับ 946.0 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นทดสอบฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล 669.8 MPa แสดงว่าฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลเมื่อผ่านการฉีดเป็นชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายกว่า HDPE และเมื่อใส่ HDPE ในปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ HDPE คือมีค่าเท่ากับ 338.8 370.8 และ 417.0 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ HDPE เพิ่มขึ้น เนื่องจาก HDPE มีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมจึงแสดงแนวโน้มค่ามอดุลัสที่สูงขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นผลึกของ HDPE มีการเคลื่อนไหวได้ยากกว่าโมเลกุลของฟิล์มรีไซเคิลและเข้าไปแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของฟิล์มรีไซเคิล ในลักษณะการผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (มีการแยกเฟสของผลึก) และอาจก่อพันธะเคมีอย่างอ่อน (พันธะไฮโดรเจน) ระหว่างเฟสได้ เนื่องจาก

มีลักษณะโมเลกุลเหมือนกัน ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงสามารถแสดงสมบัติช่วยต้านแรงดึง ทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงได้ยาก

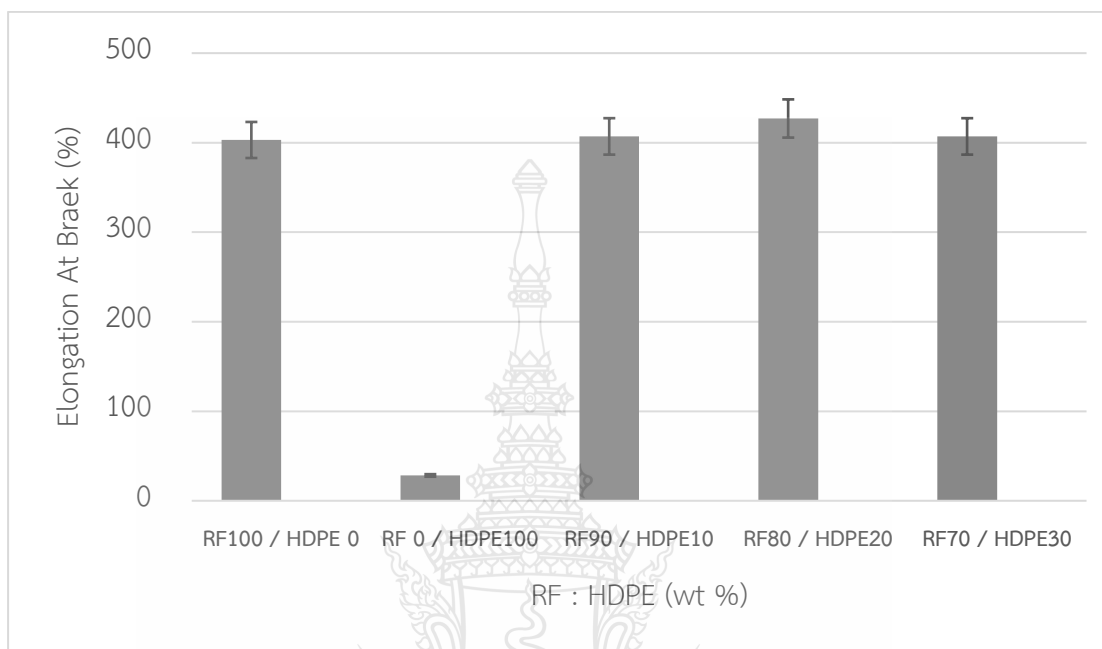


ภาพที่ 4.5 มอดุลัสของฟิล์มรีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

4.2.4 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.6 แสดงร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลผสม HDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าชิ้นทดสอบฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลมีการยืดตัวเท่ากับ 403.0 % HDPE มีการยืดตัวเท่ากับ 28.3 % ซึ่งแตกต่างกันมาก แสดงว่าสายโซ่โมเลกุลของฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลสามารถเคลื่อนที่ไหลผ่านกันได้ง่ายกว่าจึงสามารถยืดตัวได้สูงกว่าสายโซ่โมเลกุลของ HDPE ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกสูง และเมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมพบว่า % การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับของฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลคือ พอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วนมี % การยืดตัวสูงกว่าชิ้นทดสอบฟิล์มรีไซเคิลอยู่ในช่วงประมาณ 1 - 6 % เท่านั้น อาจกล่าวได้ว่าไม่มีความแตกต่างที่สำคัญ ทั้งนี้อาจสันนิษฐานได้ว่าเป็นเพราะ HDPE มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกกระจายตัวต่ำอยู่ในโครงสร้างของฟิล์มรีไซเคิล ดังนั้นจึงไม่แสดงสมบัติที่เด่นชัดในการขัดขวางการเคลื่อนไหวยของโมเลกุลของฟิล์มผสม แม้ว่า HDPE จะมีโครงสร้างที่สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ดี แต่เมื่ออยู่ในฟิล์มรีไซเคิล ซึ่งเป็นระบบพอลิเมอร์ผสมหลายชนิด (เช่น LDPE/LLDPE

ผสมกับ HDPE) การจัดเรียงตัวของ HDPE มักจะกระจายตัวในปริมาณต่ำ และไม่ต่อเนื่องทั่วทั้งโครงสร้าง



ภาพที่ 4.6 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มรีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสมฟิล์มรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

4.3 การเลือกสูตรพอลิเมอร์ผสมเพื่อเตรียมเป็นคอมโพสิต

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างฟิล์มรีไซเคิลร่วมกับ HDPE พบว่าสมบัติความทนแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมที่สภาวะการทดสอบชิ้นงานแบบชาร์ปที่มีรอยบากด้วยค้อน 4 จูล ไม่มีความแตกต่างกัน คือแรงกระทำไม่สามารถทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมแตกหักได้ การทดสอบความทนแรงดึงพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบของ HDPE 10 - 30 % โดยน้ำหนัก มีค่าไม่แตกต่างกัน (16.2 - 16.6) และมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มรีไซเคิล (15.5 MPa) และมี % การยืดตัว ณ จุดขาด (404.8 - 409.8 %) ซึ่งแตกต่างน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า % การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มรีไซเคิล (403.0 %) แต่ความแตกต่างที่เด่นชัดคือค่ามอดุลัสซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่สูตร RF : HDPE 80 : 20 % โดยน้ำหนัก มีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์มรีไซเคิล 34.2 % และที่อัตราส่วนผสม RF : HDPE 70 : 30 % โดยน้ำหนัก มีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์มรีไซเคิลถึง 50.9 % ซึ่งแสดงถึงสมบัติความคงรูปที่สูงกว่า ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่สูงขึ้น แสดงถึงการต้านทานต่อการเสียรูปภายใต้แรงดึงได้ดีกว่า ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติความคงรูปที่สูงกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบกับวัสดุที่มีมอดูลัสต่ำกว่า ดังนั้นจึงเลือกพอลิเมอร์ผสมที่สูตร 70 : 30 ไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตต่อไป

4.4 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

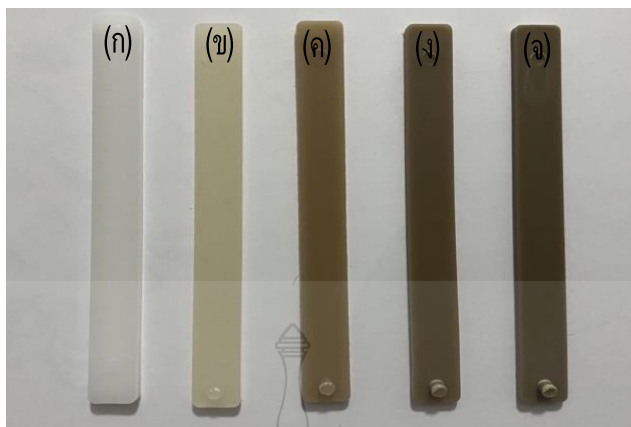
จากภาพที่ 4.7 4.8 และ 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนผสมของฟิล์มรีไซเคิลกับ HDPE ที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 % โดยน้ำหนัก (RF : HDPE) (70 : 30 wt %) และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โวลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



ภาพที่ 4.7 ชิ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) HDPE (ข) (RF:HDPE) (ค) (RF:HDPE): CaCO_3 90:10 (ง) (RF:HDPE): CaCO_3 80:20 และ (จ) (RF:HDPE): CaCO_3 70:30 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.8 ชิ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) HDPE (ข) (RF:HDPE) (ค) (RF:HDPE):WLT 90:10 (ง) (RF:HDPE):WLT 80:20 และ (จ) (RF:HDPE):WLT 70:30 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.9 ชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) HDPE (ข) (RF:HDPE) (ค) (RF:HDPE):MMT 90:10 (ง) (RF:HDPE):MMT 80:20 และ (จ) (RF:HDPE):MMT 70:30 % โดยน้ำหนัก

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตเตรียมโดยการสูตรฟิล์มรีไซเคิล RF/HDPE ในอัตราส่วน 70 : 30 % โดยน้ำหนักที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 มาใส่แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โวลลาสโทไนต์ (WLT) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ หลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นขึ้นรูปชั้นทดสอบด้วยการฉีดในแบบที่สภาวะการผสมและการฉีด เหมือนกับขั้นตอนที่ 1

จากภาพที่ 4.7 ชั้นงานทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติม 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าชั้นทดสอบมีสีอ่อนกว่า แต่ทึบแสงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม และเมื่อเพิ่มปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็น 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ชั้นทดสอบที่ได้มีสีขาวนวล และทึบแสงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติม

จากภาพที่ 4.8 เป็นชั้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่โวลลาสโทไนต์เป็นสารตัวเติม ซึ่งพบว่าปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น (10 - 30 % โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ชั้นทดสอบทึบแสง และมีสีเข้มกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม โดยชั้นทดสอบจะมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.9 พบว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนักทำให้ชั้นทดสอบเปลี่ยนสีจากสีเหลืองนวลเป็นสีน้ำตาลอ่อน และสีของชั้นทดสอบจะเข้มขึ้นเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

4.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติความทนแรงกระแทก (IS) ความทนแรงดึง (TS) ยังสัมดูลัส และ % การยืดตัว ณ จุดขาด (EB) ของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่ใส่สารตัวเติม แคลเซียม คาร์บอเนต โพลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ ที่มี % สารตัวเติมโดยน้ำหนักแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม (RF : HDPE) ที่ใส่สารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนต โพลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์

Formular	Ratio (wt %)	IS (J/m)	TS (MPa)	M (MPa)	EB (%)
(RF:HDPE) (70 : 30)	100	No break	16.3 ± 0.3	417.0 ± 27.0	409.8 ± 9.0
(RF:HDPE) : CaCO ₃	90 : 10	No break	14.8 ± 0.2	709.3 ± 73.3	395.9 ± 22.0
(RF:HDPE) : CaCO ₃	80 : 20	No break	14.4 ± 0.3	822.0 ± 38.3	382.5 ± 3.2
(RF:HDPE) : CaCO ₃	70 : 30	No break	14.4 ± 0.3	936.0 ± 34.0	143.2 ± 24.2
(RF:HDPE) : WLT	90 : 10	No break	15.7 ± 0.4	494.8 ± 13.9	376.0 ± 27.4
(RF:HDPE) : WLT	80 : 20	No break	14.1 ± 0.4	555.4 ± 27.8	356.4 ± 31.4
(RF:HDPE) : WLT	70 : 30	No break	13.5 ± 0.8	594.2 ± 62.7	314.2 ± 15.9
(RF:HDPE) : MMT	99 : 1	No break	14.2 ± 0.4	421.0 ± 19.7	401.0 ± 8.7
(RF:HDPE) : MMT	97 : 3	No break	13.9 ± 0.4	426.5 ± 17.6	402.6 ± 12.7
(RF:HDPE) : MMT	95 : 5	No break	14.7 ± 0.4	427.6 ± 14.4	404.0 ± 3.5
(RF:HDPE) : MMT	90 : 10	No break	15.4 ± 0.6	449.0 ± 12.2	348.4 ± 42.8
(RF:HDPE) : MMT	80 : 20	No break	14.9 ± 0.3	536.8 ± 20.5	227.6 ± 32.5
(RF:HDPE) : MMT	70 : 30	No break	16.6 ± 0.5	627.3 ± 34.5	101.6 ± 8.5

4.5.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

จากตารางที่ 4.2 พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต โพลลาสโทไนต์ 10 - 30 % และมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่าง ๆ พบว่าการเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ไม่ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักแต่อย่างใด ซึ่งแสดงว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ยังแสดงพฤติกรรมมีความเหนียวสูงเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจาก 2 ปัจจัยคือเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์ผสม 3 ชนิด คือ HDPE LDPE และ LLDPE โดยเฉพาะ LDPE ซึ่งเป็น

พลาสติกสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม ซึ่งโดยทั่วไป มีสมบัติคือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และเมื่อได้รับแรงกระทำ โมเลกุลสามารถสั่น (Vibration) และเกิดการเลื่อนไหล (Translation) โครงสร้างมีความแข็งเกร็งต่ำ (Stiffness) ทำให้สามารถคลายพลังงานที่ได้รับได้ดี ประกอบกับ LLDPE ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของ โพลิเอทิลีนที่มีความเหนียวสูงกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของ LDPE ปัจจัยที่ 2 คาดว่าเป็นผลมาจาก สารตัวเติมมีการกระจายตัวในเมทริกซ์พอลิเมอร์ช่วยในการรับและกระจายแรงเค้นได้บ้าง ทั้งนี้ เนื่องจากสารตัวเติมมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวกับเมทริกซ์ต่ำ จากภาพที่ 4.10 แสดงขึ้นทดสอบ ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม 3 องค์ประกอบที่เป็นเมทริกซ์ สารตัวเติมมีแรงยึดเกาะ ระหว่างผิวกับเมทริกซ์ต่ำ จึงมีอิทธิพลต่อการรับและกระจายแรงของชิ้นงานคอมโพสิตมากกว่า สารตัวเติม แต่ยังคงแสดงพฤติกรรมความเหนียวสูง ผลการทดสอบความทนแรงกระแทกชิ้นงาน จึงไม่เกิดการแตกหัก

4.5.2 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.11 พบว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่า เท่ากับ 16.3 MPa และเมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยการใส่แคลเซียมคาร์บอเนต 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่าเท่ากับ 14.8 14.4 และ 14.4 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า พอลิเมอร์ผสมประมาณ 1.5-1.9 MPa ซึ่งมีค่าต่ำมาก การที่อนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมได้ เป็นผลมาจากแคลเซียมคาร์บอเนต มีอัตราส่วนพื้นที่ผิว (Aspect Ratio) ต่ำ [8] มีการยึดเกาะที่ผิวกับเมทริกซ์ต่ำ ประกอบกับพอลิเมอร์ ผสมมีความหนืดสูง ($MFI = 1.65 \text{ g} / 10\text{min}$) จึงอาจทำให้การกระจายตัวของอนุภาคในเมทริกซ์ต่ำ และเกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) ดังนั้นผลของการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก จึงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

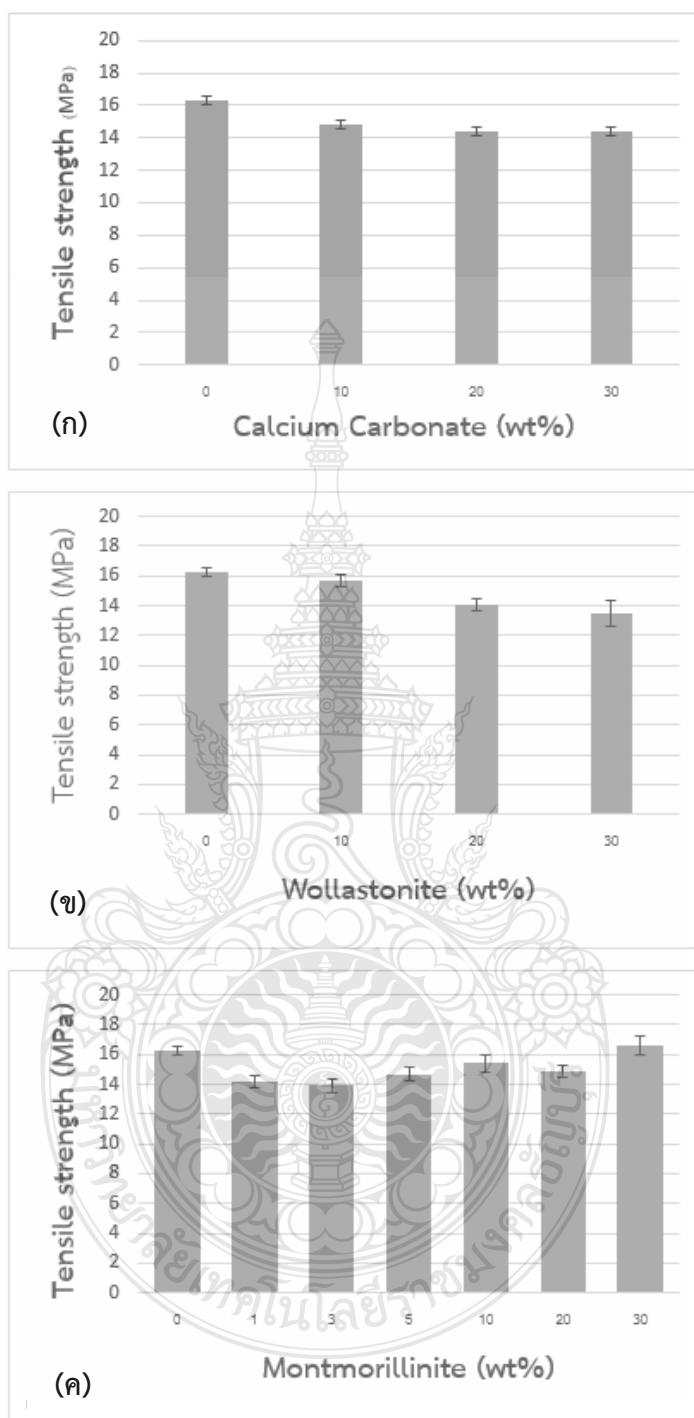
พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่ใส่โวลลาสโทไนต์เป็นอนุภาคเสริมแรงซึ่งมีอนุภาคเป็น แบบรูปเข็ม (Needle Like) พบว่าเมื่อใส่ในปริมาณน้อย (10 % โดยน้ำหนัก) มีค่าความทนแรงดึง สูงสุด คือ 15.7 MPa แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของโวลลาสโทไนต์เป็น 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ขึ้นทดสอบแสดงพฤติกรรมการรับแรงดึงลดต่ำลงเล็กน้อย คือ 14.1 และ 13.5 MPa ซึ่งแสดงแนวโน้ม ของค่าความทนแรงดึงลดลง เมื่อปริมาณของโวลลาสโทไนต์เพิ่มขึ้นอย่างไม่เด่นชัด ทั้งนี้ อาจเป็นผล มาจากการที่เมทริกซ์มีความหนืดสูง



ภาพที่ 4.10 ชั้นทดสอบความทนแรงกระแทกของฟิล์มรีไซเคิล พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์เป็นอนุภาคเสริมแรง ซึ่งมีลักษณะของอนุภาคเป็นชั้นของดิน (Clay Layer) ในการทดลองมีการใส่ทั้งในปริมาณที่ต่ำ คือ 1 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก และใส่ในปริมาณที่สูงคือ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าผลของการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่ำและปริมาณที่สูง ไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมแต่อย่างใด และผลของการใช้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติความทนแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก กล่าวคือการใส่สารตัวเติมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 1 - 5 % โดยน้ำหนัก ขึ้นทดสอบมีค่าความทนแรงดึงอยู่ระหว่าง 13.9 - 14.7 MPa มีความแตกต่างกันน้อยมากและต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม (16.3 MPa) เมื่อเทียบกับการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 10 - 30 MPa พบว่าชิ้นงานมีค่าความทนแรงดึงระหว่าง 14.9 - 16.6 ทั้งนี้อาจอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้คือ มอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะเป็นชั้นของซิลิเกต (Layer Silicate) การใส่ในปริมาณน้อยชั้นของซิลิเกตมีการแยกออก (Intercalated) มีการกระจายตัวและแทรกตัวในเนื้อเมทริกซ์ได้ดี ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของสารตัวเติมในกลุ่มเคลย์ ในงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์เพียงเล็กน้อย (1 - 5 Phr) สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ [9] ในกรณีตรงกันข้ามถ้าใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณที่สูงจะเกิดการเกาะกลุ่มและแยกเฟส (Phaseseparated) ทำให้ผลการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณที่เพิ่มขึ้น

ค่าความทนแรงดึงพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีอนุภาคเสริมแรงที่ลักษณะต่างกัน มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่ำของแคลเซียมคาร์บอเนต อัตราส่วนพื้นที่ผิวสูงของโพลลาสโพนต์ และเคลย์ พบว่าในกรณีนี้ส่งผลต่อสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมไม่แตกต่างกันมากนัก คือทั้งหมดอยู่ในช่วง 13.5 - 15.4 MPa ซึ่งต่ำกว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์เล็กน้อยคือ (16.3 MPa) ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากเนื้อเมทริกซ์ที่มีความเหนียวสูง และสารตัวเติมไม่มีการก่อกวนกับเนื้อเมทริกซ์ สารตัวเติมยังเกิดการเกาะกลุ่ม จึงไม่สามารถช่วยในการรับและถ่ายแรงเค้นได้

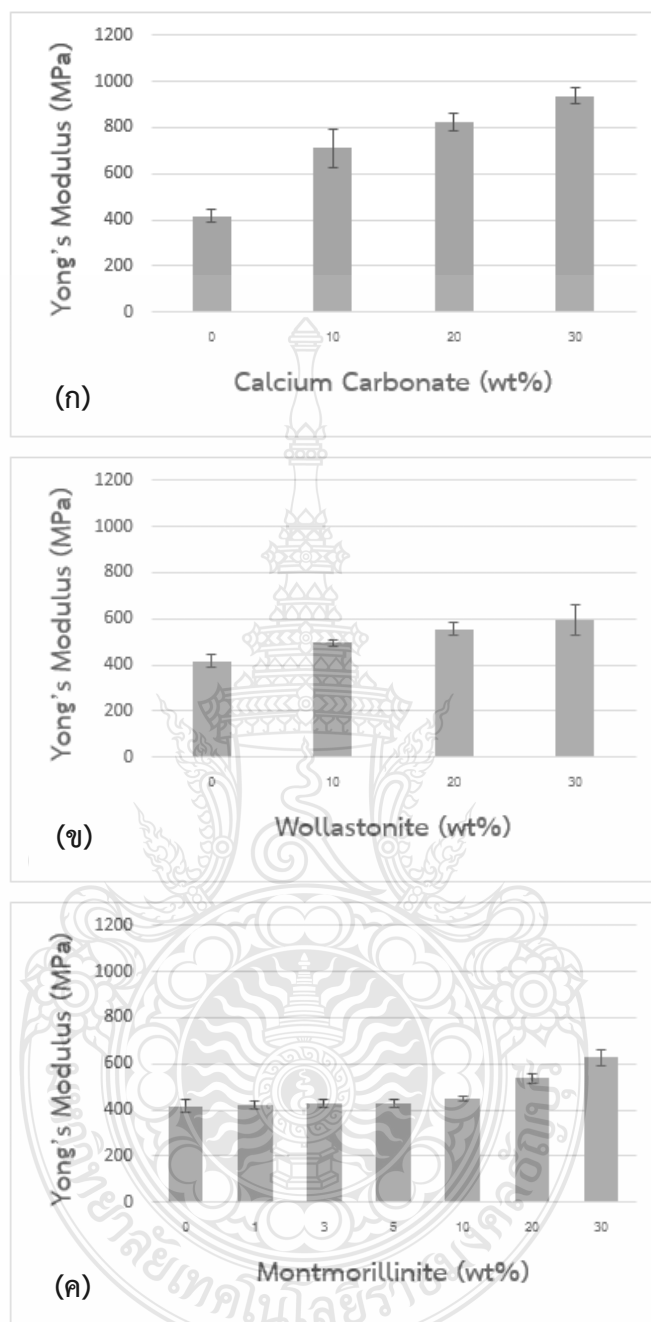


ภาพที่ 4.11 ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF:HDPE):CaCO₃
 (ข) (RF:HDPE):WLT และ (ค) (RF:HDPE):MMT % โดยน้ำหนัก

4.5.3 มอดุลัส

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.12 พบว่าค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมจากฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิล (LDPE : LLDPE) และ HDPE มีค่าเท่ากับ 417.0 MPa ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ผสม และเมื่อใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดุลัสของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น 70.0 80.3 และ 130.4 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่ำ และมีรูปอนุภาคทรงรีหรือกลม และมีความแข็งเกร็งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม สามารถกระจายหรืออาจเกาะกลุ่มแบบกระจายตัว (Dispersion) ขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมได้ดีกว่าโวลลาสโทไนต์ ซึ่งมีอนุภาครูปเข็มซึ่งพบว่าการใส่ 10 % โดยน้ำหนักในพอลิเมอร์ผสม สามารถปรับปรุงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมได้ 18.6 % เท่านั้น และเมื่อใส่ในปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น 33.1 และ 42.4 % โดยน้ำหนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาคเป็นรูปเข็ม มีการกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ได้ดีต่ำกว่า เป็นผลมาจากลักษณะของอนุภาครูปเข็มที่สามารถเรียงตัวขัดกันเอง และมีการเกาะกลุ่มทำให้การเติมในปริมาณน้อยเกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลได้ดีกว่า ซึ่งมักเกิดในกรณีที่นำมาผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง และไม่มีการยึดเหนี่ยวด้วยพันธะระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติม อย่างไรก็ตามการเติมในปริมาณที่สูงขึ้นอนุภาคของโวลลาสโทไนต์มากขึ้นสามารถขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลได้เพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสจึงเพิ่มขึ้น

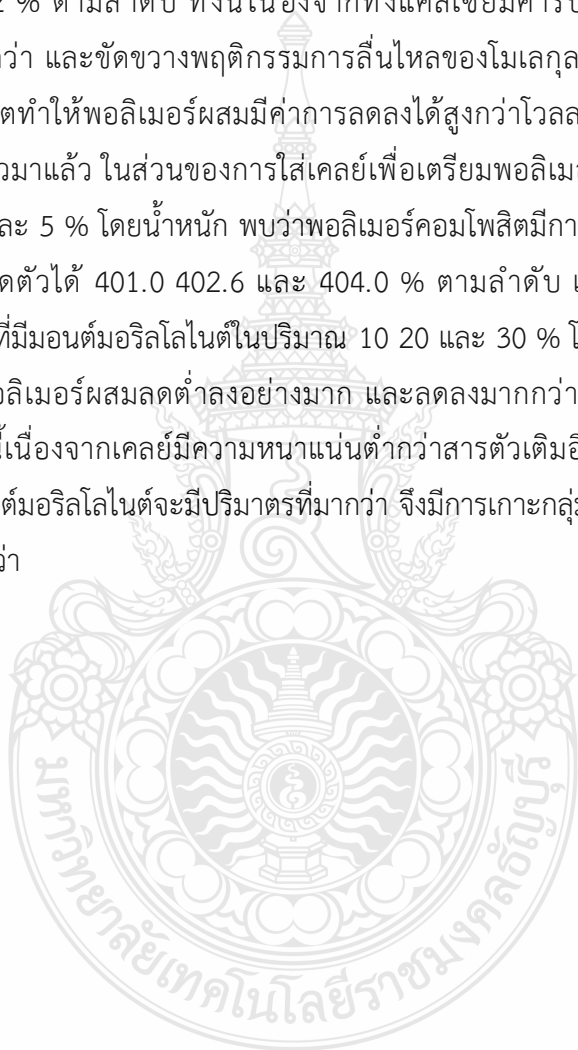
ผลของการเติมมอนต์มอริลโลไนต์เป็นอนุภาคเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสมเมริกซ์ พบว่าการใส่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณน้อย คือ 1 3 และ 5 % โดยน้ำหนักในพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต พบว่ามีค่ามอดุลัส 421.0 426.5 และ 427.6 MPa ซึ่งพบที่สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นเพราะมอนต์มอริลโลไนต์เป็นชั้นของซิลิเกตเคลย์ แต่เนื่องจากเมทริกซ์มีความหนืดสูงจึงแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ได้ยาก จึงพบว่าค่ามอดุลัสของคอมโพสิตมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่แสดงแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้น เห็นได้จากการใส่เคลย์ในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงค่ามอดุลัสของคอมโพสิต (449.0 MPa) ให้สูงขึ้น 6.1 % ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเกาะกลุ่มและขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อใส่ในปริมาณ 20 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดุลัสของคอมโพสิต 536.8 MPa สามารถปรับปรุงค่ามอดุลัสของคอมโพสิตให้สูงขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าคอมโพสิตมีค่ามอดุลัส 627.3 MPa ซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มที่มากขึ้นของมอนต์มอริลโลไนต์

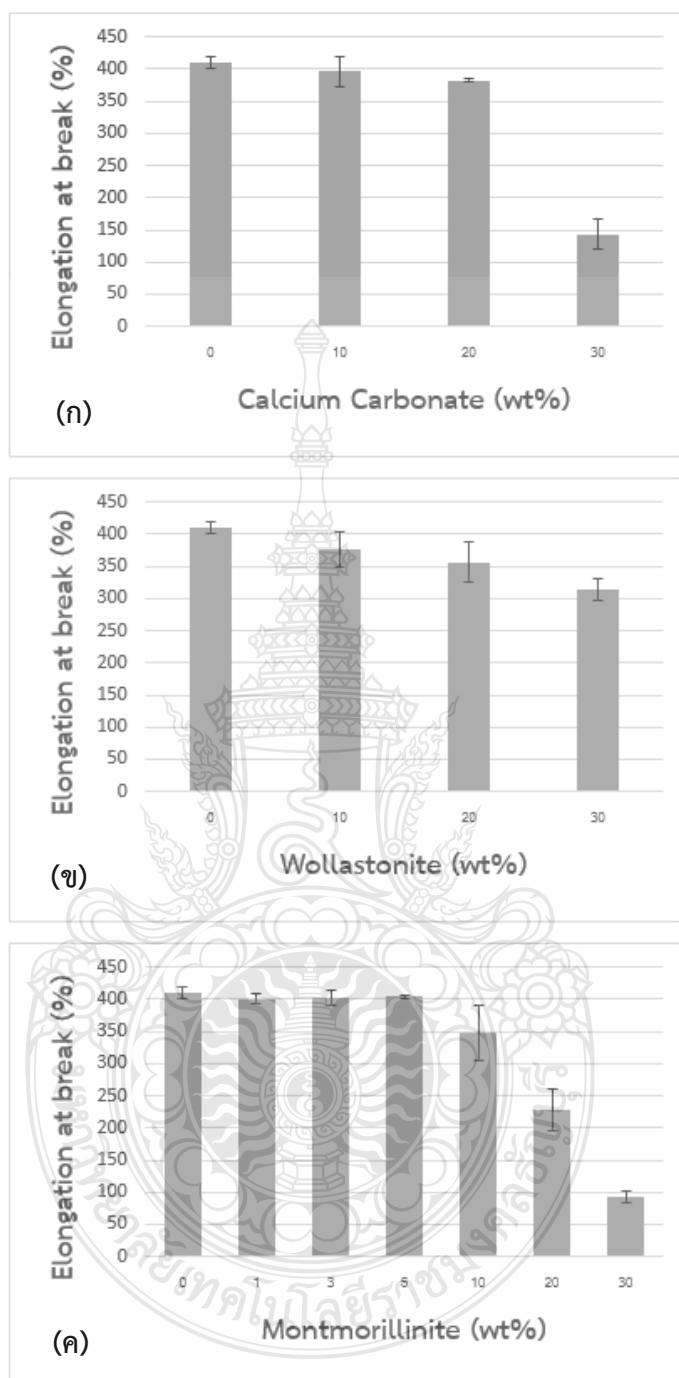


ภาพที่ 4.12 ค่ายังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF:HDPE):CaCO₃
(ข) (RF:HDPE):WLT และ (ค) (RF:HDPE):MMT % โดยน้ำหนัก

4.5.4 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.13 พอลิเมอร์ผสมมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 409.8 % เมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่า 395.9 382.5 และ 143.2 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับการเติมโวลลาสโทไนต์ ซึ่งพบว่ามีค่าการยืดตัว 376.0 356.4 314.2 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตและโวลลาสโทไนต์มีความแข็งตึงมากกว่า และขัดขวางพฤติกรรมกลไกการเลื่อนไหลของโมเลกุลพอลิเมอร์ผสม และพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าการลดลงได้สูงกว่าโวลลาสโทไนต์ซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดูลัสดั่งที่กล่าวมาแล้ว ในส่วนของการใส่เคลย์เพื่อเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่าการใส่ในปริมาณต่ำ 1 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตมีการยืดตัวลดลงกว่าพอลิเมอร์ผสมเล็กน้อย คือยืดตัวได้ 401.0 402.6 และ 404.0 % ตามลำดับ และร้อยละการยืดตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มส่งผลให้การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงอย่างมาก และลดลงมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและโวลลาสโทไนต์ ทั้งนี้เนื่องจากเคลย์มีความหนาแน่นต่ำกว่าสารตัวเติมอีก 2 ชนิด ดังนั้นเมื่อใส่น้ำหนักที่เท่ากันมอนต์มอริลโลไนต์จะมีปริมาตรที่มากกว่า จึงมีการเกาะกลุ่มและขัดขวางการเลื่อนไหลของโมเลกุลได้มากกว่า





ภาพที่ 4.13 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF:HDPE):CaCO₃
(ข) (RF:HDPE):WLT และ (ค) (RF:HDPE):MMT % โดยน้ำหนัก

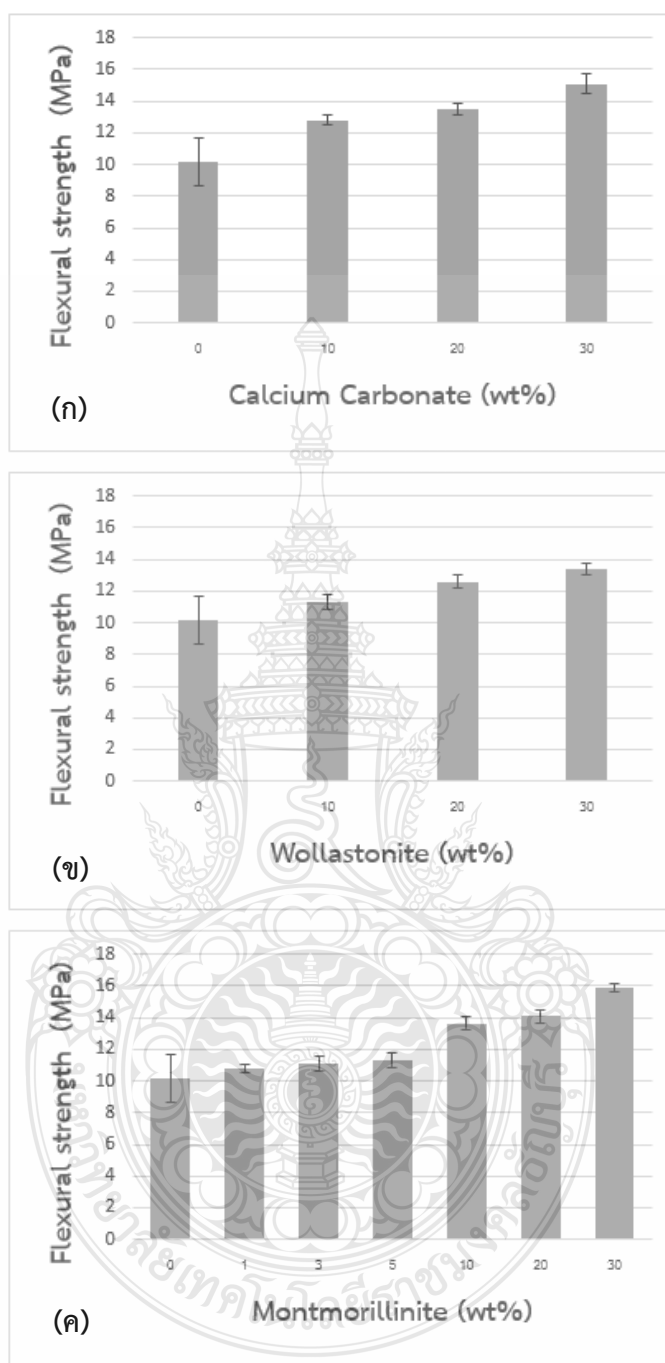
4.5.5 ความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสแรงดัดโค้ง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม (RF : HDPE 70 : 30) และค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต ไวลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์เป็นการเสริมแรงแบบอนุภาคที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม RF:HDPE และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF : HDPE) : CaCO_3 , (RF : HDPE) : WLT และ (RF : HDPE) : MMT

Formula (wt%)	Ratio (wt%)	FS (MPa)	FM (MPa)
(RF : HDPE) (70 : 30)	100	10.2 ± 1.5	114.6 ± 12.5
(RF : HDPE) : CaCO_3	90 : 10	12.8 ± 0.4	201.6 ± 38
(RF : HDPE) : CaCO_3	80 : 20	13.5 ± 0.5	221.8 ± 30
(RF : HDPE) : CaCO_3	70 : 30	15.1 ± 1.0	243.2 ± 44.9
(RF : HDPE) : WLT	90 : 10	11.3 ± 0.7	179.2 ± 32.6
(RF : HDPE) : WLT	80 : 20	12.6 ± 0.7	189.0 ± 23.6
(RF : HDPE) : WLT	70 : 30	13.4 ± 0.6	236.6 ± 39.2
(RF : HDPE) : MMT	99 : 1	10.8 ± 0.4	194.0 ± 21.8
(RF : HDPE) : MMT	97 : 3	11.1 ± 0.7	169.0 ± 22.1
(RF : HDPE) : MMT	95 : 5	11.3 ± 0.7	163.8 ± 13.9
(RF : HDPE) : MMT	90 : 10	13.6 ± 0.6	213.8 ± 18.1
(RF : HDPE) : MMT	80 : 20	14.1 ± 0.7	304.8 ± 79.3
(RF : HDPE) : MMT	70 : 30	15.9 ± 0.4	316.6 ± 45.8

หมายเหตุ : FS หมายถึง Flexural Strength FM หมายถึง Flexural Modulus



ภาพที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF:HDPE):CaCO₃
 (ข) (RF:HDPE):WLT และ (ค) (RF:HDPE):MMT % โดยน้ำหนัก

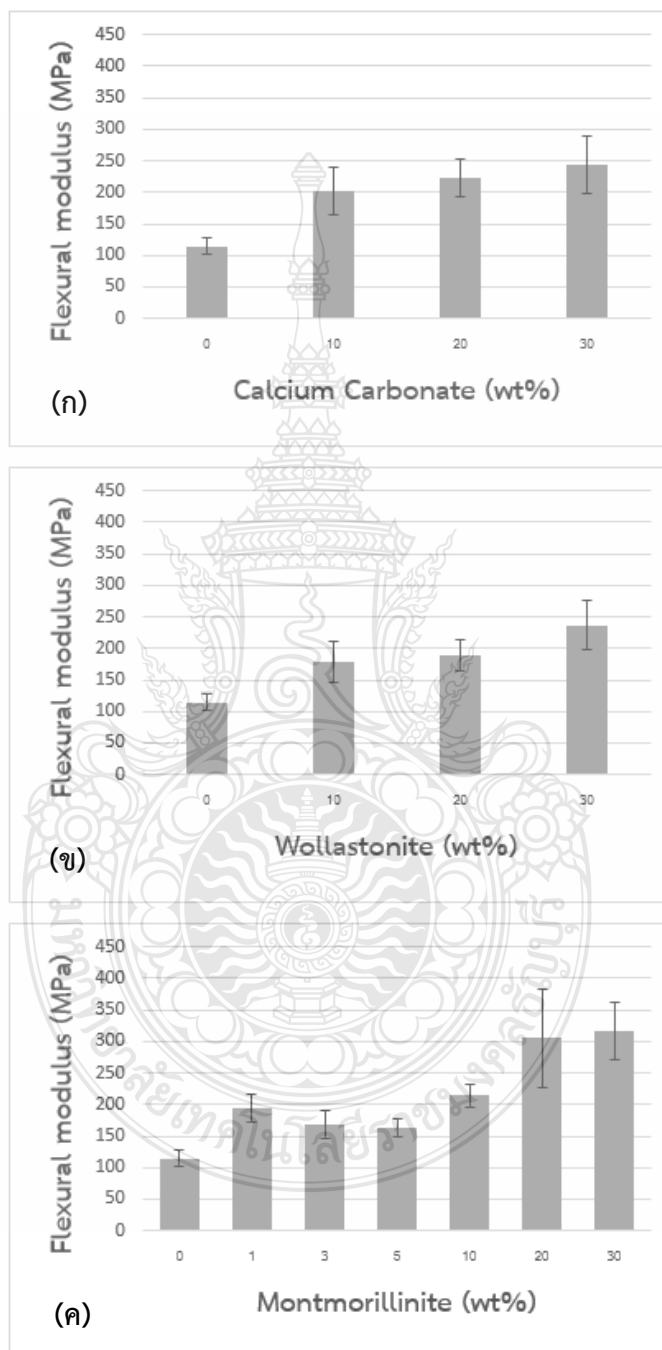
ความทนแรงดัดโค้ง

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.14 พบว่าพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด มีค่าความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม (10.2 MPa) ทั้งหมด โดยการใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนักช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดัดโค้งได้ 25.4 32.3 และ 48.0 % ตามลำดับ และการใส่โวลลาสโทไนต์ในน้ำหนักเท่ากัน ช่วยปรับปรุงแรงดัดโค้งให้กับคอมโพสิตได้ 10.7 23.5 และ 31.3 % ตามลำดับการที่สารตัวเติมสามารถปรับปรุงความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมได้ เนื่องจากสารตัวเติมมีความแข็งตัวของโครงสร้างสูงกว่าโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม จึงขัดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลขณะรับแรงเค้นของคอมโพสิตได้ ในส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เติมในปริมาณ 1 3 และ 5 และที่เติมในปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าการใส่ในปริมาณต่ำ (1 - 5 % โดยน้ำหนัก) ปรับปรุงความทนแรงดัดโค้งได้เพียง 5.8 - 10.7 % ตามปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณที่น้อย จึงมีการกระจายตัวจะขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมได้ไม่มาก และเมื่อใส่ในปริมาณมาก 10 - 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าผลการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดัดโค้งของคอมโพสิตมีค่าอยู่ระหว่าง 33.3 - 55.8 % ตามปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น และสามารถประสิทธิภาพปรับปรุงสมบัติความทนแรงดัดโค้งของคอมโพสิตได้สูงสุดเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโวลลาสโทไนต์ที่ใส่ในคอมโพสิตที่ % เท่ากัน ตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

มอดูลัสแรงดัดโค้ง

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.15 พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดูลัสแรงดัดโค้ง 114.6 MPa และเมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนุภาคเสริมแรง 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนักพบว่าค่ามอดูลัสของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเป็น 201.6 221.8 และ 243.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการเติมโวลลาสโทไนต์ที่ใส่ในปริมาณ % เท่ากัน ซึ่งสามารถปรับปรุงมอดูลัสของคอมโพสิตได้เท่ากับ 179.2 189.0 และ 236.6 MPa การที่โวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาครูปเข็ม (Needle Like) แต่ปรับปรุงค่ามอดูลัสของคอมโพสิตได้น้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากเหตุผลที่กล่าวมายังอาจเป็นผลมาจากการที่โวลลาสโทไนต์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเมื่อคิดเป็น % น้ำหนักที่เท่ากับแคลเซียมคาร์บอเนต โวลลาสโทไนต์ จึงมีปริมาตรน้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิเมอร์คอมโพสิต และการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าทุกอัตราส่วนทำให้ค่ามอดูลัส แรงดัดโค้งของคอมโพสิตสูงขึ้นโดยการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ 1 - 5 % โดยน้ำหนัก พบว่าการใส่ที่ 1 % โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งสูงสุดเท่ากับ 194.0 MPa และมอดูลัสแรง ดัดโค้งลดลงตามปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเกาะกลุ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 10 - 30 % โดยน้ำหนักกลับพบว่าที่อัตราส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ 30 % โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งสูงสุดเท่ากับ 316.6 MPa

ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 176 % ทั้งนี้เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีปริมาณมากเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มที่แข็งแรงและแสดงพฤติกรรมคล้ายอนุภาคนาขนาดใหญ่



ภาพที่ 4.15 มอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF:HDPE):CaCO₃
(ข) (RF:HDPE):WLT และ (ค) (RF:HDPE):MMT % โดยน้ำหนัก

4.6 อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อน (HDT)

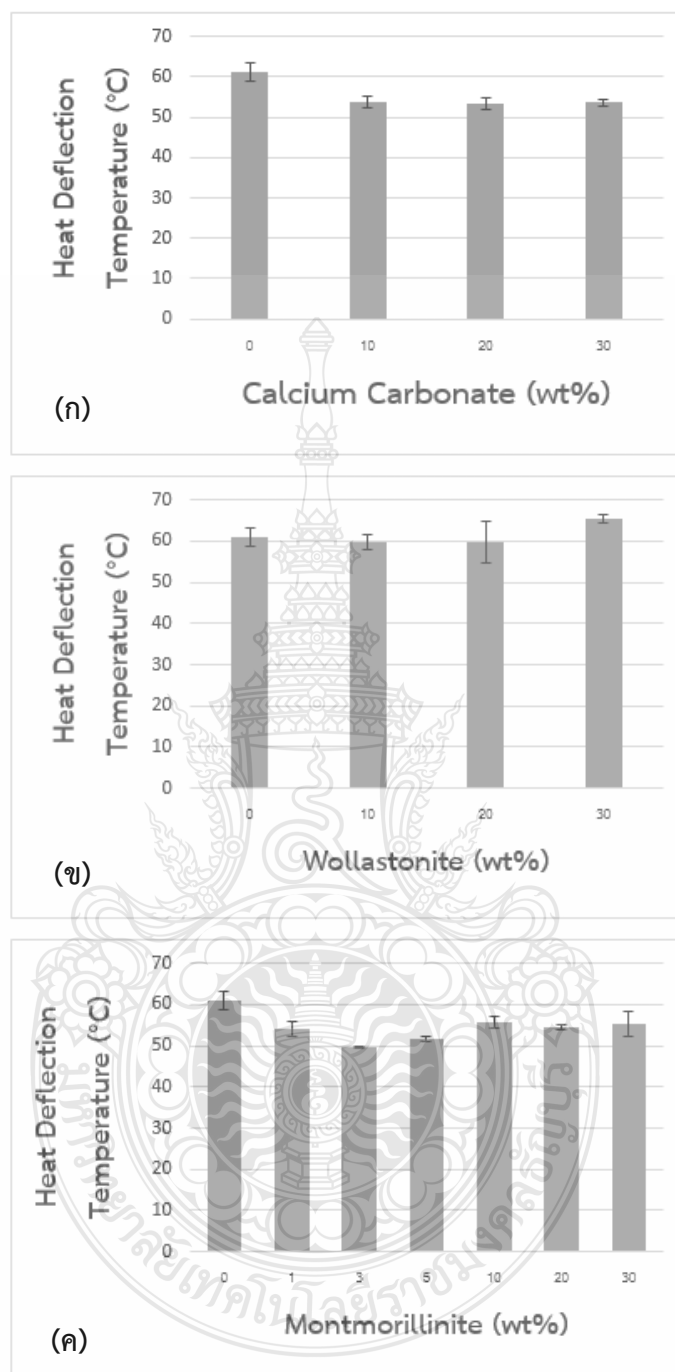
จากตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนของ ขึ้นทดสอบจากพอลิเมอร์ผสม (RF : HDPE) และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF : HDPE) : CaCO_3 (RF : HDPE) : WLT และ (RF : HDPE) : MMT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ อุณหภูมิโค้งงอภายใต้อุณหภูมิ และน้ำหนัก เป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ขึ้นทดสอบเกิดการโค้งงอภายใต้แรงเค้น จากการใช้งานจนเกิดการเสียเสถียรภาพทางการรับน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนจากการใช้งาน หรือเป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิใช้งานสูงสุดก่อนที่ชิ้นงานหรือขึ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลง รูปร่างภายใต้การใช้งานที่อุณหภูมิและน้ำหนัก

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

(RF : HDPE) และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF : HDPE) : CaCO_3 , (RF : HDPE) : WLT และ (RF:HDPE) : MMT

Formula (wt %)	Ratio (wt %)	HDT (°C)
(RF : HDPE) : (70 : 30)	100	61.5±2.3
(RF : HDPE) : CaCO_3	90 : 10	53.8±1.4
(RF : HDPE) : CaCO_3	80 : 20	53.3±1.3
(RF : HDPE) : CaCO_3	70 : 30	53.6±0.8
(RF : HDPE) : WLT	90 : 10	59.6±1.7
(RF : HDPE) : WLT	80 : 20	59.7±4.9
(RF : HDPE) : WLT	70 : 30	65.5±1.0
(RF : HDPE) : MMT	99 : 1	54.1±1.6
(RF : HDPE) : MMT	97 : 3	49.6±0.1
(RF : HDPE) : MMT	95 : 5	51.7±0.5
(RF : HDPE) : MMT	90 : 10	55.5±1.4
(RF : HDPE) : MMT	80 : 20	54.3±0.6
(RF : HDPE) : MMT	70 : 30	55.2±3.0

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.16 พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าอุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนเท่ากับ 61.5°C และเมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอเนตในทุกอัตราส่วนพบว่าอุณหภูมิลดลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง $53.3 - 53.8^{\circ}\text{C}$ แสดงว่าขึ้นทดสอบสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สภาวะแรงกดและอุณหภูมิการทดสอบต่ำลงประมาณ 8°C ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีการยึดเกาะกันได้ดีจึงทำให้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุที่ได้รับแรงกดจะโค้งงอได้ง่ายขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับการใส่โพลลาสโพนต์เป็นสารเสริมแรงพบที่อัตราส่วน 10 และ 20 % ของโพลลาสโพนต์ทำให้คอมโพสิตมีอุณหภูมิลดลงจากพอลิเมอร์ผสมประมาณ $1.8 - 1.9^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น และเมื่อใส่ในอัตราส่วน 30 % โดยน้ำหนักพบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของขึ้นทดสอบได้คือมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สภาวะแรงกดเท่ากับ 65.5°C ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 4°C เป็นเพราะโพลลาสโพนต์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีประกอบกับโครงสร้างเป็นรูปคล้ายเข็มช่วยรับแรงและกระจายแรงได้ดีกว่าลักษณะอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารเสริมแรงที่อัตราส่วน 1 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมินี้มีค่าลดลงเท่ากับ 54.1 49.6 และ 51.7°C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณน้อยช่วยปรับปรุงสมบัติด้านอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมได้ดีกว่าการใส่ในปริมาณมาก เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นชั้นทำให้พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ ประกอบกับการเกาะกลุ่มกันต่ำจึงช่วยกระจายแรงได้ดีกว่า แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์กลับพบว่าอุณหภูมิโค้งงอของคอมโพสิตมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เป็น 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิโค้งงอเนื่องจากความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง $54.3 - 55.5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใกล้เคียงกับการใส่ที่อัตราส่วน 1 % โดยน้ำหนัก (54.1°C) และต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดระหว่างชั้นและอนุภาคทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม และแสดงพฤติกรรมคล้ายสารตัวเติมอนุภาคขนาดเล็กเช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนต



ภาพที่ 4.16 อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต
 (ก) (RF:HDPE):CaCO₃ (ข) (RF:HDPE):WLT (ค) (RF:HDPE):MMT % โดยน้ำหนัก

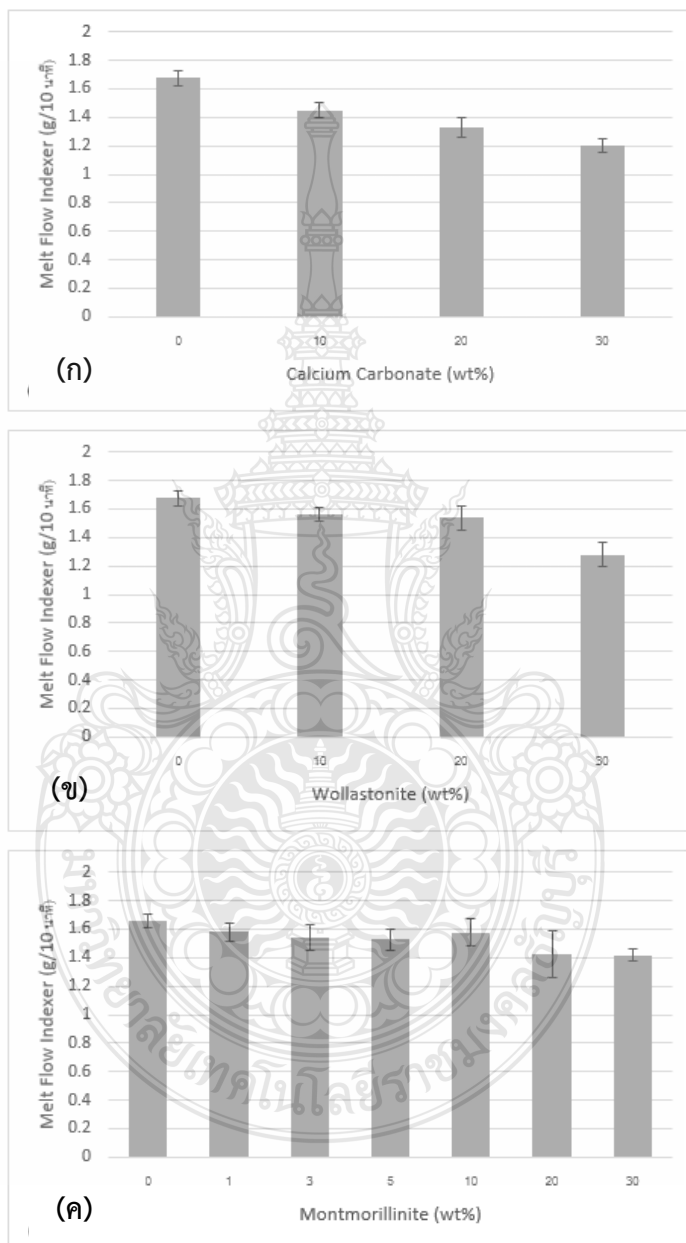
4.7 ดัชนีการหลอมไหล

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

Formula	Ratio (wt%)	MFI (g/10 นาที)
(RF : HDPE) : (70 : 30)	100	1.67 ± 0.4
(RF : HDPE) : CaCO ₃	90 : 10	1.45 ± 0.5
(RF : HDPE) : CaCO ₃	80 : 20	1.33 ± 0.6
(RF : HDPE) : CaCO ₃	70 : 30	1.20 ± 0.4
(RF : HDPE) : WLT	90 : 10	1.56 ± 0.05
(RF : HDPE) : WLT	80 : 20	1.54 ± 0.08
(RF : HDPE) : WLT	70 : 30	1.27 ± 0.08
(RF : HDPE) : MMT	99 : 1	1.57 ± 0.06
(RF : HDPE) : MMT	97 : 3	1.53 ± 0.09
(RF : HDPE) : MMT	95 : 5	1.52 ± 0.07
(RF : HDPE) : MMT	90 : 10	1.57 ± 0.09
(RF : HDPE) : MMT	80 : 20	1.42 ± 0.16
(RF : HDPE) : MMT	70 : 30	1.41 ± 0.06

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอนุภาคเสริมแรง มีค่าลดลงตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมและในทำนองเดียวกัน ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีโวลลาสโทไนต์ เป็นอนุภาคเสริมแรงมีค่าลดลงตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าคอมโพสิตของแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าดัชนีการไหลอยู่ในช่วงสูงสุด 1.45 และต่ำสุด 1.20 กรัม/10 นาที ซึ่งโดยรวมแล้วต่ำกว่าโวลลาสโทไนต์คอมโพสิตซึ่งมีค่าดัชนีการไหลสูงสุดเท่ากับ 1.56 และต่ำสุดเท่ากับ 1.27 กรัม/10 นาที ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะอนุภาคของโวลลาสโทไนต์มีโอกาจัดเรียงอนุภาคตามทิศทางการไหลในพอลิเมอร์หลอมเมื่อมีแรงกดได้สูงกว่าอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหลของมอนต์มอริลโลไนต์เช่นเดียวกัน การที่ค่าดัชนีการไหลของคอมโพสิตมีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจาก

อนุภาคเสริมแรงของแคลเซียมคาร์บอเนตโวลลาสโทไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้ความหนืดของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโดยการที่ค่าดัชนีการไหลลดลง



ภาพที่ 4.17 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) (RF:HDPE):CaCO₃

(ข) (RF:HDPE):WLT (ค) (RF:HDPE):MMT % โดยน้ำหนัก

4.8 สมบัติการลุกไหม้

จากตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติสมบัติการลุกไหม้ ตามมาตรฐานการทดสอบการลุกไหม้และลามไฟ UL - 94 Vertical Burning Test ของพอลิเมอร์ผสม RF/HDPE และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE : CaCO₃ RF/HDPE : WLT และ RF/HDPE : MMT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 4.6 พฤติกรรมการลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต
RF/HDPE/CaCO₃ RF/HDPE/WLT และ RF/HDPE/MMT

Formula	Ratio (wt%)	ลักษณะการลุกไหม้
(RF : HDPE) (70 : 30)	100	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 12.5 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.44 นาที
(RF : HDPE) : CaCO ₃	90 : 10	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 20.8 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 1.59 นาที
(RF : HDPE) : CaCO ₃	80 : 20	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 33.6 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 1.48 นาที
(RF : HDPE) : CaCO ₃	70 : 30	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 34.4 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 1.51 นาที
(RF : HDPE) : WLT	90 : 10	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 11.4 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.12 นาที
(RF : HDPE) : WLT	80 : 20	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 14.8 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 1.57 นาที
(RF : HDPE) : WLT	70 : 30	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 30.6 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 1.41 นาที

ตารางที่ 4.6 พฤติกรรมการลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

RF/HDPE/CaCO₃ RF/HDPE/WLT และ RF/HDPE/MMT (ต่อ)

Formula	Ratio (wt%)	ลักษณะการลุกไหม้
(RF : HDPE) : MMT	99 : 1	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 12.7 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.03 นาที
(RF : HDPE) : MMT	97 : 3	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 15.4 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.07 นาที
(RF : HDPE) : MMT	95 : 5	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 12.8 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.11 นาที
(RF : HDPE) : MMT	90 : 10	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 13.0 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.01 นาที
(RF : HDPE) : MMT	80 : 20	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 27.4 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 1.51 นาที
(RF : HDPE) : MMT	70 : 30	ติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เปลวไฟสีฟ้า เปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 41.4 วินาที เปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เวลาลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 1.38 นาที

จากตารางที่ 4.6 พบว่าพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่มีสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด มีการติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด และเปลวไฟหยดทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ โดยพอลิเมอร์ผสมที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีการติดไฟมีควันเกิดการหลอมหยดและเปลวไฟเริ่มหยดที่เวลา 20.8 33.6 และ 34.4 วินาที ทำให้การลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 มีเวลาลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม (2.44 นาที) คือมีค่าเท่ากับ 1.59 1.48 และ 1.51 นาที ตามลำดับ อาจเป็นเพราะแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคทรงรี จึงมีการยึดเกาะกับเมทริกซ์ต่ำ และเกิดการเกาะกลุ่มจึงอาจกระจายตัวในเมทริกซ์ต่ำ กรณีพอลิเมอร์ผสมที่ผสมโวลลาสโทไนต์ที่ 10 20

และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดการติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยุด และเปลวไฟเริ่มหยุดที่เวลา 11.4 14.8 และ 30.6 วินาที การลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 มีเวลาลดลง คือ 2.12 1.57 และ 1.41 นาที ตามลำดับ เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีอนุภาคคล้ายรูปเข็ม ความหนาแน่นที่สูง จึงเกิดการดึงเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์ผสมให้เกิดการไหลหยุดได้เร็วขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่มอดมอร์ริสไลไนต์ในปริมาณที่ต่ำ คือ 1 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก พบว่าติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยุด และเปลวไฟเริ่มหยุดที่เวลา 12.7 15.4 และ 12.8 วินาที การลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.03 2.07 และ 2.11 นาที เช่นเดียวกับการติ่มมอดมอร์ริสไลไนต์ในปริมาณที่สูง คือ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าติดไฟ มีควัน เกิดการหลอม หยุด และเปลวไฟเริ่มหยุดที่เวลา 13.0 27.4 และ 41.4 วินาที การลุกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลา 2.01 1.51 และ 1.38 นาที ตามลำดับ เป็นเพราะเคลย์มีโครงสร้างเป็นชั้นซิลิเกต ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นสูง ทำให้แทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสมได้ยาก จึงเข้าไปแทรกตัวในพอลิเมอร์ผสมได้น้อยและเกิดการเกาะกลุ่ม ดังนั้นจึงไม่สามารถช่วยให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการหน่วงไฟได้ การเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของพอลิเมอร์ผสมได้ เนื่องจากสารตัวเติมเกิดการยึดเกาะกับผิวเมทริกซ์ต่ำกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำเกิดการเกาะกลุ่ม ดังนั้นผลการทดลองจึงไม่แตกต่างกันมาก



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมรีไซเคิล (LDPE : LLDPE) โดยเติมสารตัวเติมชนิด 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต โพลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อศึกษาผลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

5.1 ผลการศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

จากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลของฟิล์มรีดร่วม LDPE : LLDPE กับ HDPE และเตรียมพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต โดยเติมสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โพลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ ลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบจาก (RF : HDPE) มีลักษณะค่อนข้างทึบแสง สีเหลืองนวล เมื่อมีการเติมปริมาณ HDPE พบว่ามีสีเหลืองนวล ทึบแสง และมีสีอ่อนลง (ขาวขึ้น) ตามปริมาณการเติมของ HDPE ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE มากขึ้น สีของฟิล์มมีแนวโน้มอ่อนลง เนื่องจากโครงสร้างผลึกของ HDPE ช่วยกระเจิงแสงและลดผลของการเลี้ยวที่เกิดจากพอลิเมอร์รีไซเคิล ลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต มีสีขาวนวล ทึบแสง เนื่องจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่กระเจิงแสงและเพิ่มค่าความทึบแสงของวัสดุ คอมโพสิตที่เติมโพลลาสโทไนต์ พบว่าชิ้นทดสอบมีความทึบแสง เนื่องจากโพลลาสโทไนต์มีสีขาว พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่เติมมอนต์มอริลโลไนต์ มีสีน้ำตาลอ่อนและทึบแสง โดยสีของชิ้นทดสอบจะเข้มขึ้นเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของแร่มีคุณสมบัติดูดกลืนและกระเจิงแสง รวมถึงถ่ายทอดสีของตัวเติมเข้าสู่เนื้อวัสดุ

5.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่เตรียมได้ ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระทำของชิ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม (RF : HDPE) พบว่าความทนแรงกระทำของชิ้นทดสอบมีค่าสูง (ไม่เกิดการแตกหัก) พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่มีค่ามอดูลัสสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับทุกสูตรคือ สูตรผสม (RF : HDPE) 70 : 30 % โดยน้ำหนัก ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่สูงขึ้น แสดงถึงการต้านทานต่อการเสียรูปภายใต้แรงดึงได้ดีกว่า ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติความคงรูปที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีมอดูลัสต่ำกว่า ดังนั้นจึงเลือกสูตรนี้เพื่อเตรียมชิ้นงานคอมโพสิตต่อไป

ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมพบว่า การเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ขึ้นทดสอบ ไม่เกิดการแตกหัก สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต และแร่โอลาสโทไนต์ พบว่ามีความทนแรงดึงลดลงเล็กน้อย แต่มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ แคลเซียมคาร์บอเนต และแร่โอลาสโทไนต์เช่นเดียวกับคอมโพสิตที่เติมมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นสารเสริมแรง แสดงให้เห็นว่าสารตัวเติมทั้งสามชนิดมีบทบาทเป็นสารเสริมแรงที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความคงรูปของวัสดุ

ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตพบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต แร่โอลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยปรับปรุงความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิต ไม่ได้มากนัก โดยที่มอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วน 30 % โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความทนแรงดัดโค้งของคอมโพสิตได้ดีที่สุด เพราะมีผลต่อการกระจายแรงและเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง และมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วน 1 % โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความทนแรงดัดโค้งของคอมโพสิต ได้ต่ำที่สุด เนื่องจากปริมาณตัวเติมต่ำเกินไปที่จะสร้างโครงสร้างเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพทั่วทั้งแมทริกซ์

อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนพบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต และมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่าง ๆ ส่งผลให้อุณหภูมิโค้งงอภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและความร้อนมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม แสดงว่าสารตัวเติมเหล่านี้ ไม่ได้ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียรูปเมื่อโดนความร้อนและแรงกดอย่างชัดเจน ในส่วนของ โอลาสโทไนต์พบว่าที่ 90 อัตราส่วน 30 % โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของขึ้นทดสอบได้คือ มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สภาวะแรงกดเท่ากับ 65.5 °C ซึ่งเป็นค่าสูงสุดสาเหตุเนื่องจากโอลาสโทไนต์มีโครงสร้างเป็นเส้นใยที่แข็งแรง ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียรูปของแมทริกซ์พอลิเมอร์

ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต พบว่าเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต โอลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ส่งผลทำให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต มีแนวโน้มลดลงการลดลงนี้สะท้อนถึงความหนืดของแมทริกซ์พอลิเมอร์ที่สูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคตัวเติมทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานต่อการไหลของพอลิเมอร์เมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลว

ผลการทดสอบลูกไหม้ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต พบว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดการติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยดและเปลวไฟหยด ทำให้ฝ้ายเกิดการเผาไหม้ เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าติดไฟเกิดการหลอมหยด มีควัน เวลาลูกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลาเร็วขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น มีเวลาอยู่ในช่วง 1.48 - 1.59 นาที ในส่วนของโอลาสโทไนต์ พบว่าติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยด เวลาลูกไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลาเร็วขึ้นตามปริมาณของโอลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น มีค่าเวลาอยู่ในช่วง 1.41 - 2.12 นาที และการเติม

มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่าง ๆ พบว่าเกิดการติดไฟ มีควัน เกิดการหลอมหยดเวลาถูกไฟไหม้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ใช้เวลาเร็วขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น มีเวลาอยู่ในช่วง 1.38 - 2.11 นาที การเติมสารตัวเติมทั้งสามชนิด ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของพอลิเมอร์ผสมได้ พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิตยังคงมีลักษณะ ติดไฟง่าย มีควัน และเกิดการหลอมหยด

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนางาน

5.2.1 ได้วัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมกับสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โวลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีสมรรถนะเหมาะสมสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์อ่อนที่ได้จากการฉีดที่ต้องการความทนแรงกระแทกสูง เพิ่มมูลค่าของฟิล์มรีดร่วมรีไซเคิลและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หลังจากนั้นสามารถศึกษาเพิ่มเกี่ยวกับการใช้สารประสานเพื่อปรับปรุงสมบัติความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม

5.2.2 ทราบถึงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมกับสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แร่โวลลาสโทไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ ควรศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน เช่น อุณหภูมิการหลอมผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ และร้อยละการเกิดผลึกใหม่ เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกล โดยสามารถใช้ผลในการทดลองนี้ไปใช้ในรายวิชาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนช่วยมากในการออกแบบ เลือกวิธี และประเมินผล ของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานจริง เช่น ก่อนสังเคราะห์ กำหนดเป้าหมายว่าต้องการพอลิเมอร์ที่ “แข็ง, เหนียว, ยืดหยุ่น, ทนร้อน, ทนเย็น” แค่นั้น ระหว่างสังเคราะห์ ใช้สมบัติเหล่านี้เป็นเกณฑ์ทดสอบเพื่อปรับสภาวะ (ชนิดโมโนเมอร์, ตัวเร่ง, อุณหภูมิ, เวลา) หลังสังเคราะห์ ใช้ทดสอบสมบัติ (Tensile Test, Dynamic Mechanical Analysis Instrument (DMA), Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermogravimetric Analysis (TGA)) เพื่อเป็นการยืนยันว่าได้พอลิเมอร์ตามที่ต้องการ

5.2.3 เป็นทางเลือกสำหรับวิศวกรออกแบบผลิตภัณฑ์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในการเลือกใช้วัสดุ และถ้าจะให้เห็นการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก ควรตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

5.2.4 การนำพลาสติกกรีไซเคิลจากการทำปฏิบัติการมาใช้ ช่วยเปลี่ยนขยะพลาสติกจากที่เป็น “ของเสีย” ให้กลายเป็น “วัตถุดิบทดแทน” ซึ่งสร้างประโยชน์หลายด้าน ได้แก่

1. ด้านการเรียนรู้ – ส่งเสริมทักษะและความเข้าใจของนักศึกษาและนักวิจัย
2. ด้านสิ่งแวดล้อม – ลดปริมาณขยะพลาสติกและส่งเสริมความยั่งยืน

3. ด้านเศรษฐกิจและสังคม – เพิ่มมูลค่าของวัสดุพลาสติก และสร้างจิตสำนึก
ในการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

นอกจากนี้ การนำพลาสติกรีไซเคิลมาใช้อย่างช่วย กระตุ้นความรับผิดชอบและความตระหนักรู้
ต่อการใช้พลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน



บรรณานุกรม

- [1] RMUTT. **คณะวิศวกรรมศาสตร์** [ออนไลน์] 2565 [อ้างเมื่อ 15 เมษายน 2568]. จาก <https://engineer.rmutt.ac.th/>
- [2] RMUTT. **ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ** [ออนไลน์] 2565 [อ้างเมื่อ 15 เมษายน 2568]. จาก <https://engineer.rmutt.ac.th/materials>
- [3] จุไรรัตน์ ดวงเดือน. **Low-density Polyethylene** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://www.rmutphysics.com/chemistryglossary/index>
- [4] MO Memoir. **ลักษณะสายโซ่โมเลกุล** [ออนไลน์] 2552 [อ้างเมื่อ 4 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://tamagozilla.blogspot.com/2009/09/mo-memoir.html>
- [5] อำนวย ลาภเกษมสุข. **เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ ภาพนิ่ง** ปทุมธานี : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2559.
- [6] คลังปัญญาจุฬา. **การสังเคราะห์ LLDPE** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 4 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก https://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream//12345678/34318/5/Nutchaya_an_ch2.pdf
- [7] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. **พอลิเมอร์เบื้องต้น 2** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง; 2549.
- [8] HatenaBlog. **Blown Film Extrusion Materials Used & Process** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2564]. <http://ptfe-machinery.hatenablog.com/entry/2017/03/29/153740>
- [9] Chrystal Plastic. **Blown film extrusion** [ออนไลน์] 2563 [อ้างเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://web.Lerelaisinternet.com/chrystalplastic/index.php/en/know-how/blown-film-extrusion>
- [10] Industrialextrusion. **Co-extrusion** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก http://www.industrial/extrusionmachinery.com/plastic_extrusion_co_extrusion.html
- [11] ScienceDirect. **Extrusion coating** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>
- [12] Acoextrusion. **The coextrusion Process** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://math.unice.fr/~laure/declic/coextrusion/Acoextrusion.html>
- [13] Safepack. **Extrusion Coating & lamination** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://www.safepack.com/products/multilayer-packaging-solutions/poly-laminates/>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] BOBST. **Laminating process** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://www.bobst.com/user/products/laminating/process/>
- [15] MCPP. **ฟิล์มหลายชั้น** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://www.mcpp-global.com/th/asia/Applications-th/segment/flexible-packaging>
- [16] Shrikant Athavale. **Latest review of lamination methods adhesives** [ออนไลน์] 2562 [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://www.slideshare.net/ashrikant58/latest-review-of-lamination-methods-adhesives>
- [17] ธนาวดี ลีจากภัย. **การรีไซเคิลกระดาษและพลาสติก** กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ; 2545.
- [18] Prodigy. **พลาสติกรีไซเคิล** [ออนไลน์]. [อ้างเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://prodigy.co.th/>
- [19] Monomaterial. **การรีไซเคิลฟิล์ม** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://www.synergypak.co.th/2019/11/01/mono-material/>
- [20] อำนวย ลากเกษมสุข. **เทอร์มอพลาสติกเรซิน** ปทุมธานี : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2562.
- [21] เฉลิมเกียรติ เพชรเรือง. **การเตรียมและวิเคราะห์พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตรีไซเคิล/โคพอลิเอสเทอร์ อีลาสโตเมอร์/เบนโทไนด์นาโนคอมพอสิต** [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2562.
- [22] Blogspot. **Composite**. [ออนไลน์] 2566 [อ้างเมื่อ 4 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://castironductilemanholecover.blogspot.com/2012/12/composite>
- [23] Mesfin Kebede. **Fabrication and Mechanical Property Characterization of Sisal fiber Reinforced Epoxy Resin For Automotive Body Application**, [Thesis master of science in Mechanical Engineering] (Mechanical Design) Graduate School of Addis Ababa University; 2015.
- [24] Kmutt. **วัสดุคอมโพสิต** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 4 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://auto.kmutt.ac.th/custom/uploads/files/1533012166.pdf>
- [25] Wikipedia. **วัสดุผสม** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/วัสดุผสม>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [26] Rubber. สารตัวเติม (fillers) [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://rubber.oie.go.th/box/Article>
- [27] นันทน์ลิน ชูทอง. เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต : สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยา [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2558.
- [28] คชินท์ สายอินทวงศ์. Wollastonite [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_wollastonite.php
- [29] Indiamart. Wollastonite Powder [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <https://www.indiamart.com/proddetail/wollastonite-powder-1388946530.html>
- [30] S. Chuayjuljit and S. Ketthongmongkol. “Properties and morphology of injection-and compression- molded thermoplastic polyurethane/ polypropylene- graft- maleic anhydride/ wollastonite composites.” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2013 August 26 (7)pp. 923 – 935.
- [31] ปิยมาภรณ์ จารวงศ์. แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ [ออนไลน์] 2545 [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/1483/2/piyamaporn>
- [32] คชินท์ สายอินทวงศ์. Montmorillonite [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://www.tewada9.com/bentonite.html>
- [33] แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก <http://www.tewada9.com/bentonite.html>
- [34] ทักษพร รียาพันธ์. สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต/ไซเคิล/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลลาสโตนคอมพอสิต [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2562.
- [35] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. สมบัติของพอลิเมอร์ กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2554.
- [36] Vishu Shas. *Handbook of plastics Testing Technology* John Wiley @Sons, Canada, 1998.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [37] SubsTech. การทดสอบความทนแรงดัดงอ [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก www.substech.com
- [38] WIKIPEDIA. เทอร์โมแกรมแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะการดูดกลืนและคายความร้อน [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2564]. จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_scanning_calorimetry
- [39] พิชามญช์ องค์กรีตระกูล. การปรับปรุงความต้านทานต่อการขีดข่วนของชิ้นงานภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีน [วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเคมี ภาควิชา วิศวกรรมเคมี] คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2558.
- [40] เจษฎินทร์ โพธิ์งาม. อิทธิพลของการรีไซเคิลที่มีผลต่อสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2560.
- [41] ธัญวิทย์ ช่อนภู. ผลของการใช้เอทิลีนไวไนลอะซิเตตต่อสมบัติของขวดพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต เทคโนโลยีพอลิเมอร์] คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2561.
- [42] พิสิฐพงศ์ ปานจ้อย. สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมคอมพอสิตของฟิล์มรีดรวม LDPE/LLDPE รีไซเคิล/HDPE/CaCO₃ [วิทยานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2564.
- [43] Sineenart Chariyachotilert, Naruekmon Kooudomrut and Wipada Rittisith. **Properties of Recycled Plastics from HDPE Drinking Water Bottles** Kasetsart J. (Nat. Sci.), 2006, pp 166 – 171.
- [44] Wen-Yi Wang, Xiao-Fei Zeng, Guo-Quan Wang, and J. Chen, “Preparation and characterization of calcium Carbonate/ Low- Density- Polyethylene,” **Journal of Applied Polymer Science** (20 July 2007) :Vol. 106(3) pp. 1932 – 1938.
- [45] Moayad N. Khalaf, Mechanical properties of filled high density polyethylene. **Journal of Saudi Chemistry Society** (January 2015) : VOL.19 pp 88-91.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [46] S. Suwannachot, P. Chaiwutthinan and A. Larpkasemsuk, “Recycled poly(ethylene terephthalate) / polypropylene/ wollastonite composites using PP- g- MA as compatibilizer: Mechanical, thermal and morphological properties,” **Journal of Metals, Materials and Minerals** (December 2018) : 115-123.
- [47] Ismail Yuhaida, Salmah Hussein, “ Hanafi Ismail, Firuz Zainuddin Tensile Properties of Wollastonite Filled High Density Polyethylene/ Natural Rubber Composites,” **Journal of Applied Mechanics and Materials**, 754 - 755 , 215 - 219.
- [48] วรณัฐ เรืองโกสุม. การศึกษาสมบัติของพอลิเอทีลีน/เคลย์ นาโนคอมโพสิต [วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2550.
- [49] M. K. Chang, S. J. Li and K. S. Wu. “A study of strength and thermal stability of Low-density polyethylene grafted maleic anhydride/montmorillonite nanocomposites,” **Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Kuala Lumpur, Malaysia**, (January 2011): 22 – 24, 201

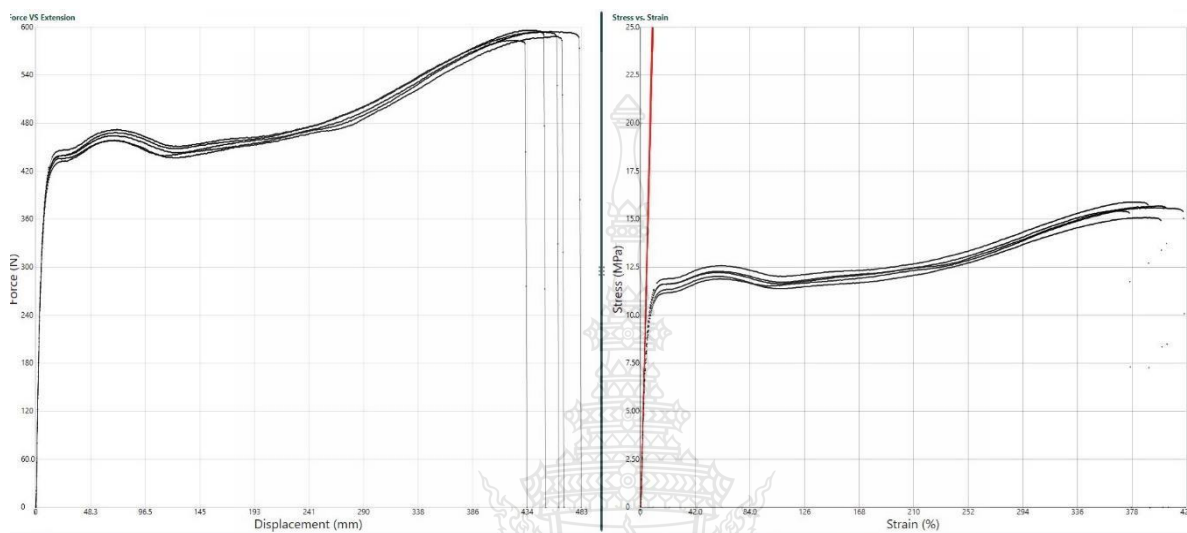


ภาคผนวก

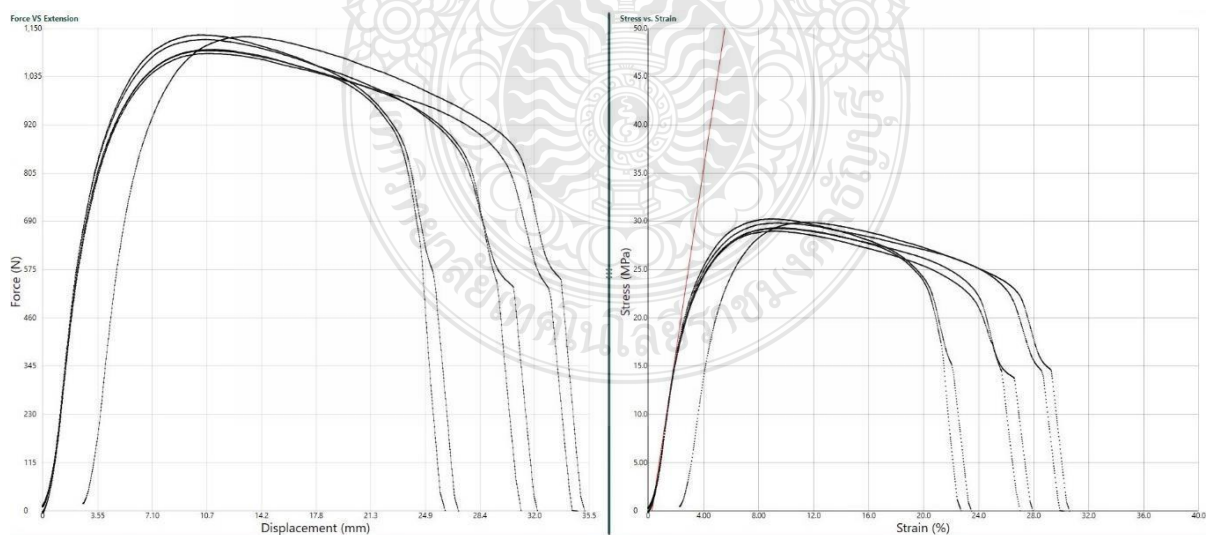


ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติเชิงกล

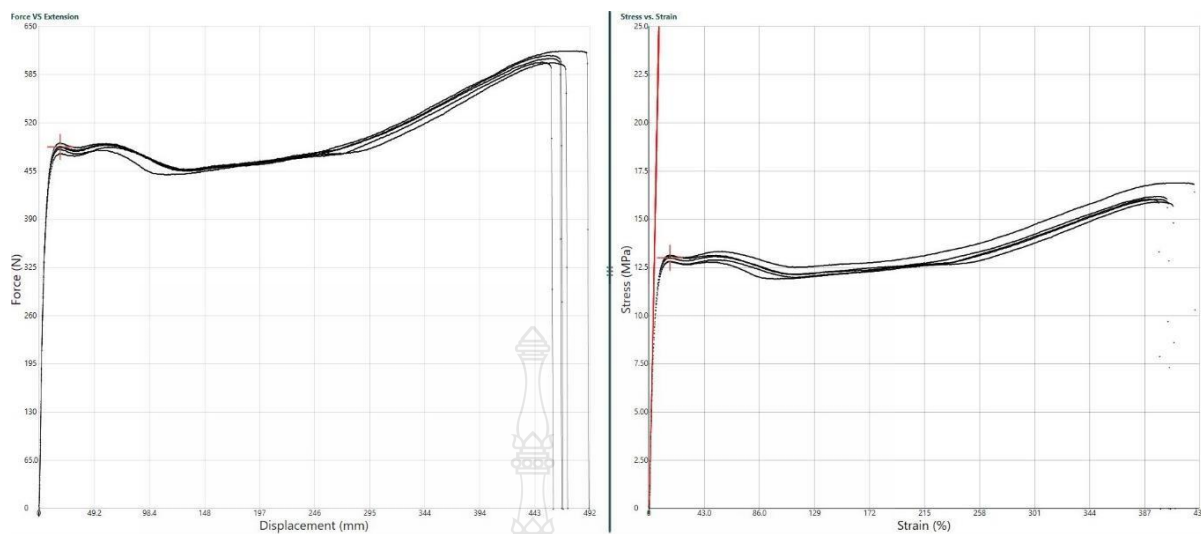
ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงของ (RF) HDPE และ พอลิเมอร์ผสม RF/HDPE



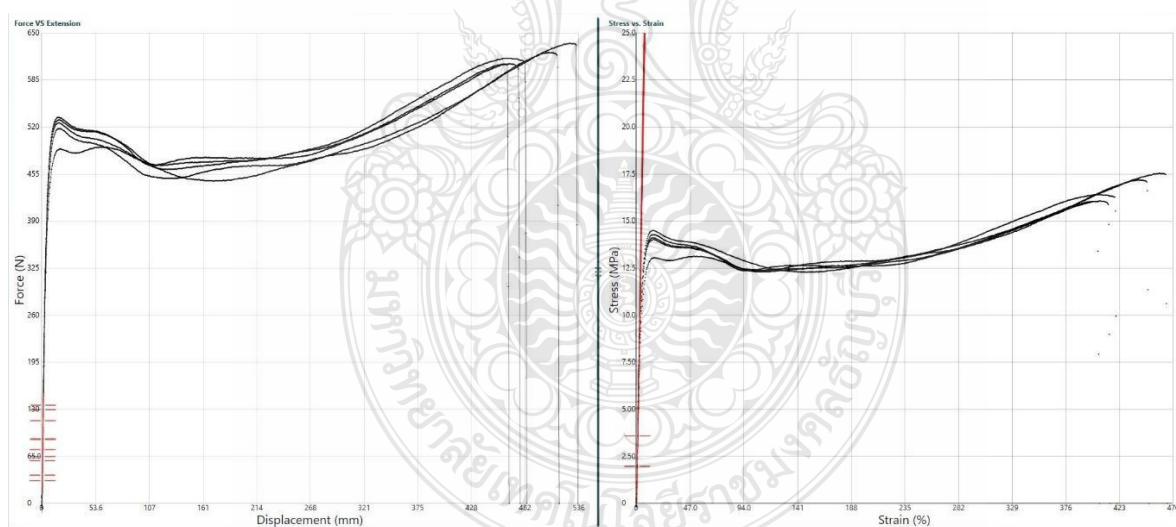
ภาพที่ ก.1 กราฟการทนต่อแรงดึงของฟิล์มรีไซเคิล (RF)



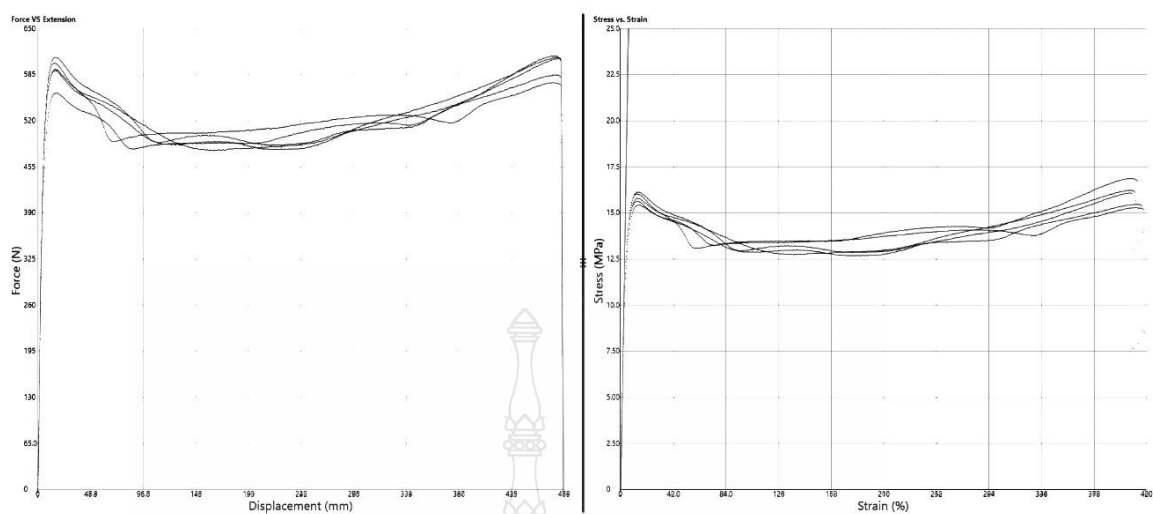
ภาพที่ ก.2 กราฟการทนต่อแรงดึงของ HDPE



ภาพที่ ก.3 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม RF/HDPE 90/10 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.4 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม RF/HDPE 80/20 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.5 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม RF/HDPE 70/30 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างค่าการทนต่อแรงดึงของ (RF) HDPE และ พอลิเมอร์ผสม RF/HDPE

การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE (wt%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation at Break(%)
100/0	15.1	271	401
	15.4	280	376
	15.9	287	391
	15.6	268	418
	15.7	275	405
0/100	29.9	711	29.4
	29	954	26.7
	29.2	945	25.7
	29.8	773	28.8
	29.3	939	21.3

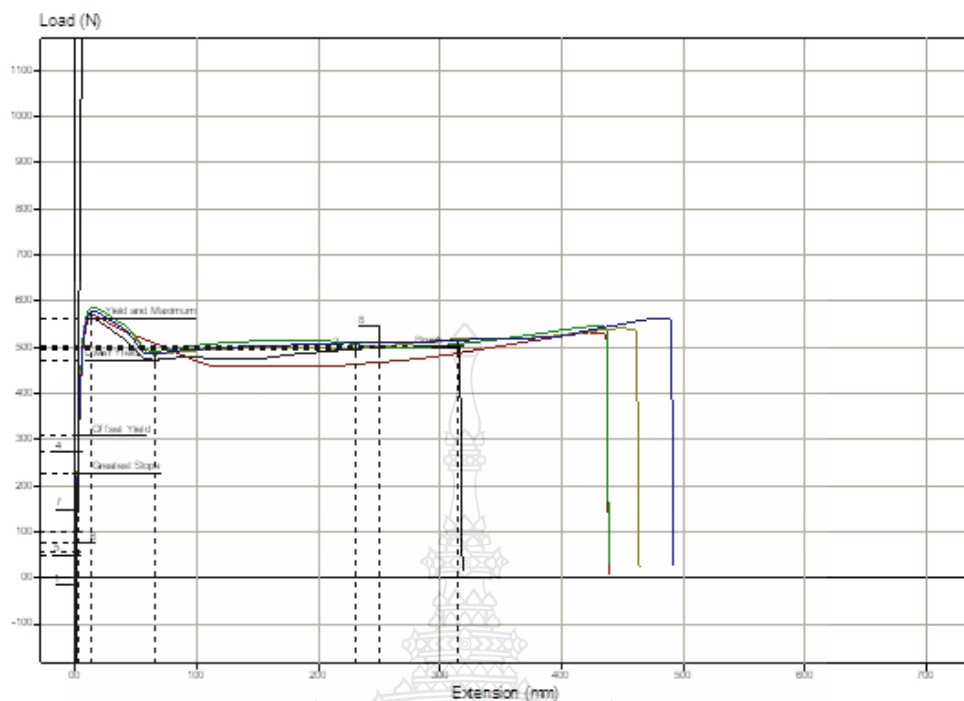
การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE (wt%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation at Break(%)
90/10	16.2	345	405
	15.4	335	410
	15.9	334	426
	15.6	331	406
	15.7	349	398
80/20	17.2	388	447
	16.1	364	414
	17.5	394	464
	16.4	342	420
	16	366	404
70/30	16.3	397	411
	16.9	440	413
	16.1	451	418
	16.1	390	397
	16.1	407	419

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างค่าการทนต่อแรงกระแทกของ (RF) HDPE และพอลิเมอร์ผสม RF/HDPE

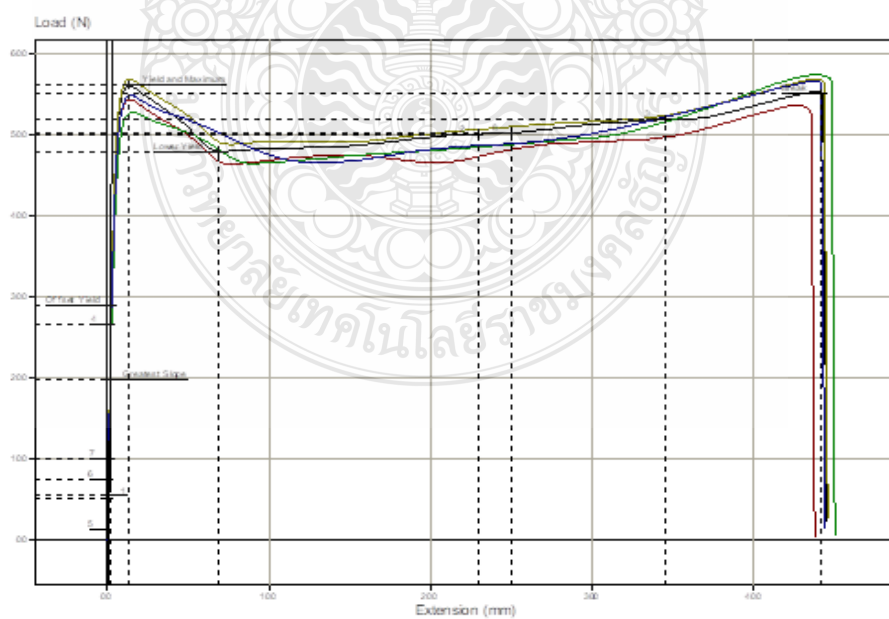
การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE (wt%)	ค่าทนต่อแรงกระแทก (J/m)
100/0	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
0/100	60
	66.7
	55
	53.3
	55
	55
	60
	66.7
	34.4
	33.3

การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE (wt%)	ค่าทนต่อแรงกระแทก (J/m)
70/30	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break
	No break

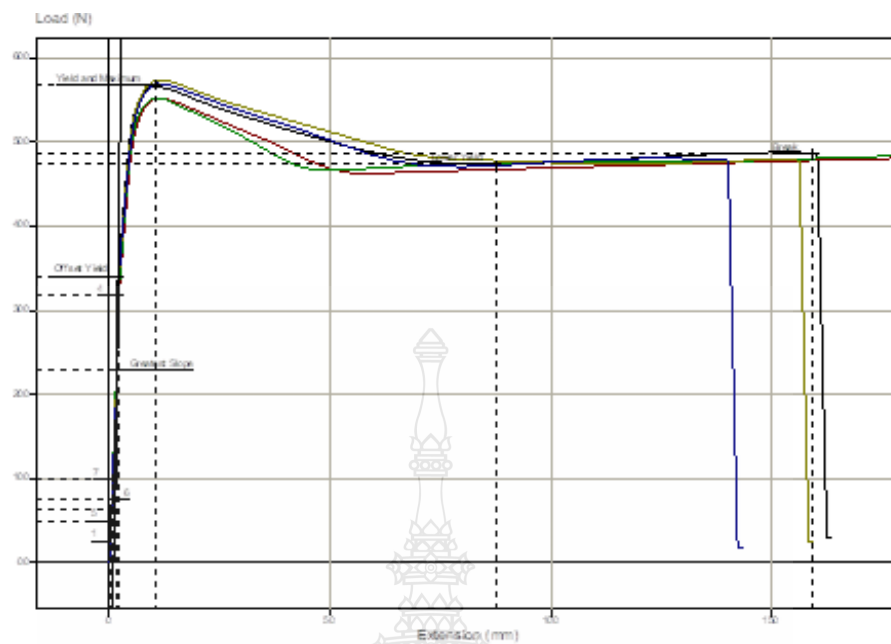




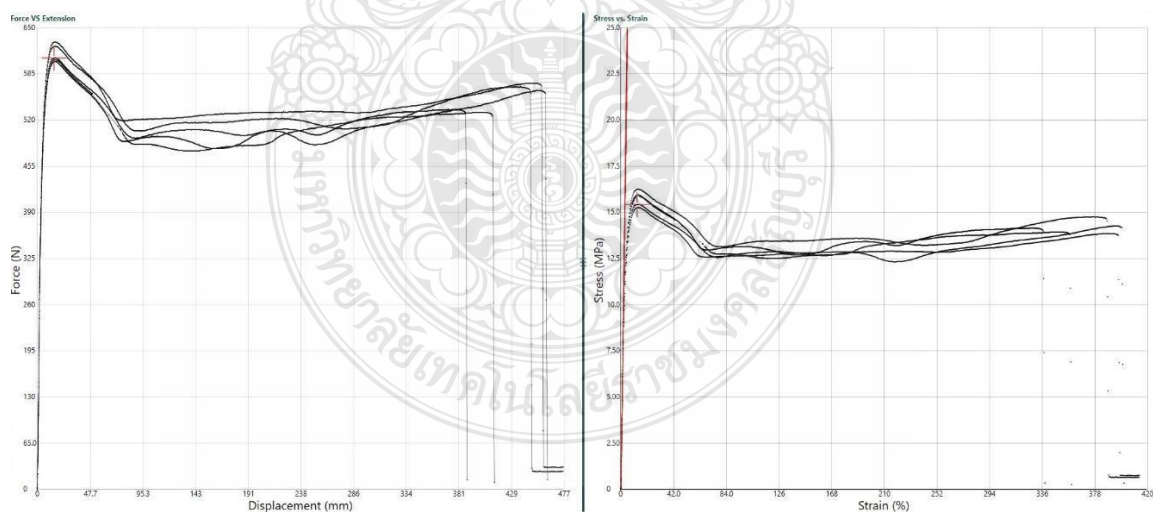
ภาพที่ ก.6 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/CaCO₃ 90/10 % โดยน้ำหนัก



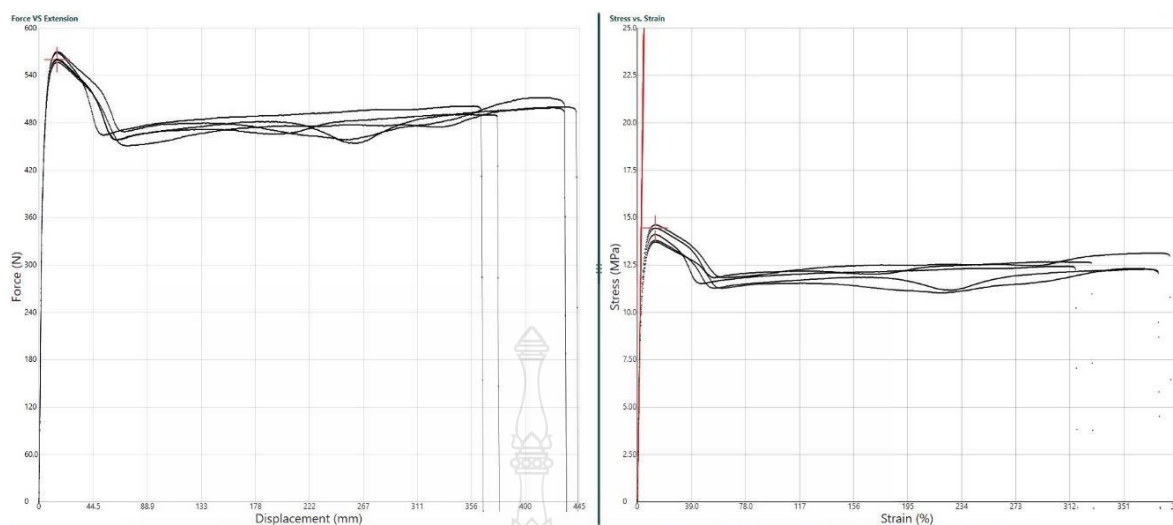
ภาพที่ ก.7 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/CaCO₃ 80/20 % โดยน้ำหนัก



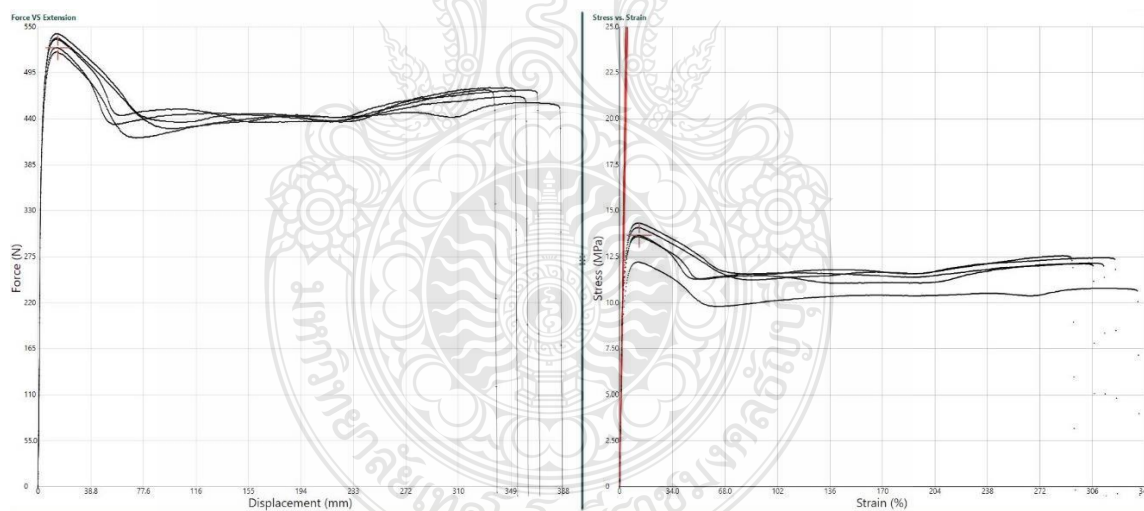
ภาพที่ ก.8 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/CaCO₃ 70/30 % โดยน้ำหนัก



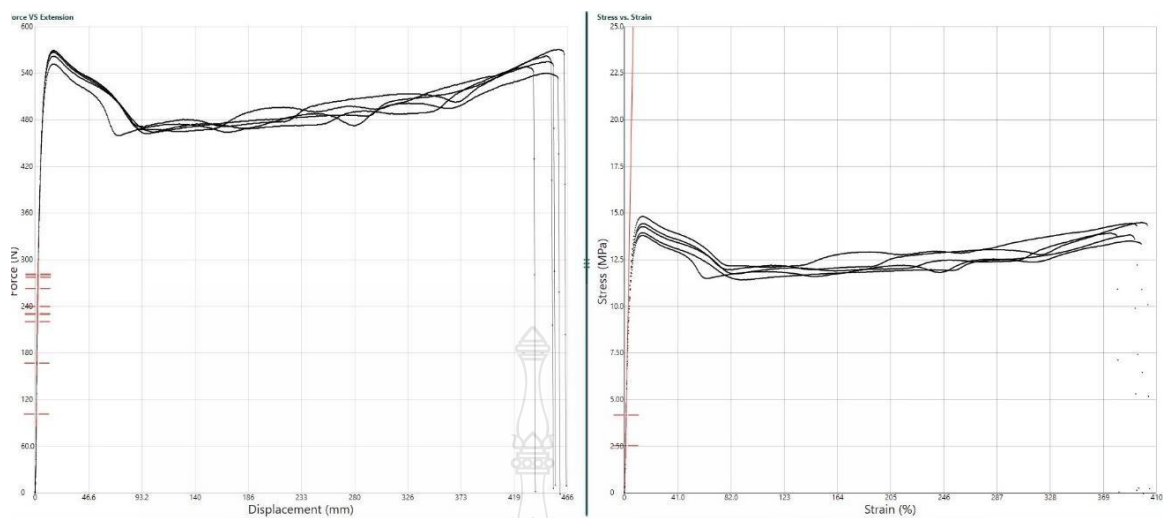
ภาพที่ ก.9 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/WLT 90/10 % โดยน้ำหนัก



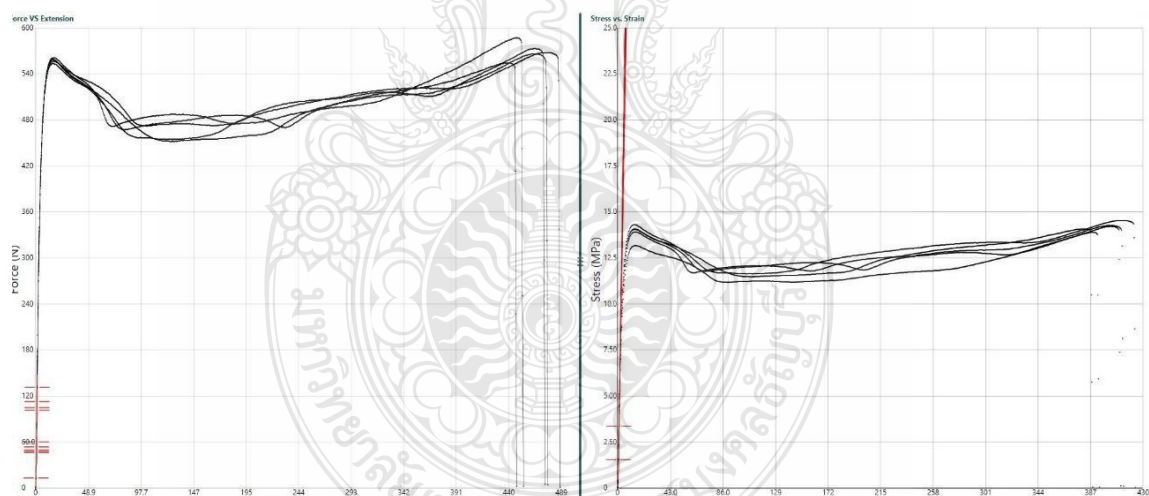
ภาพที่ ก.10 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/WLT 80/20
% โดยน้ำหนัก



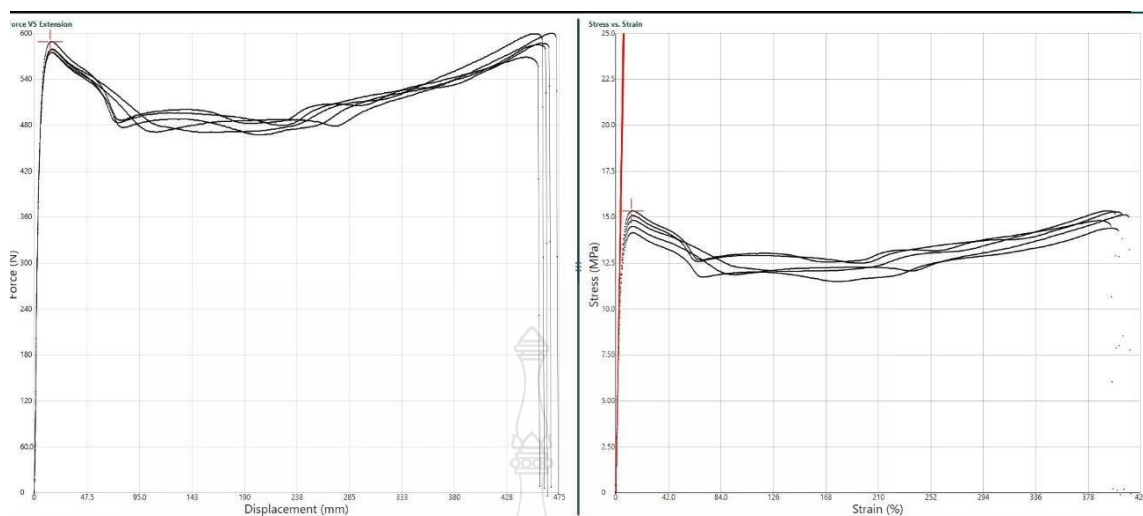
ภาพที่ ก.11 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/WLT 70/30
% โดยน้ำหนัก



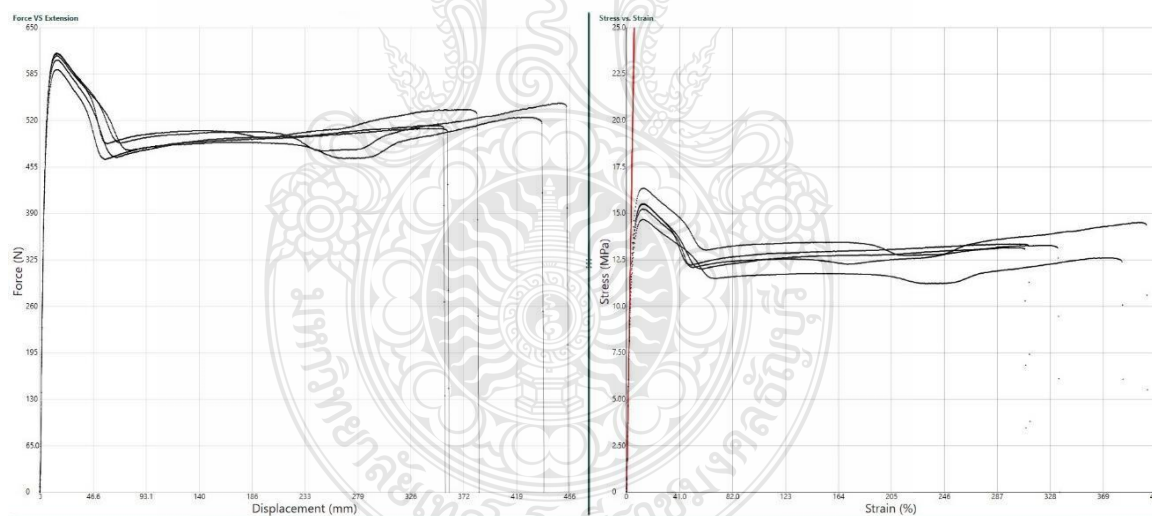
ภาพที่ ก.11 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/MMT 99/1
% โดยน้ำหนัก



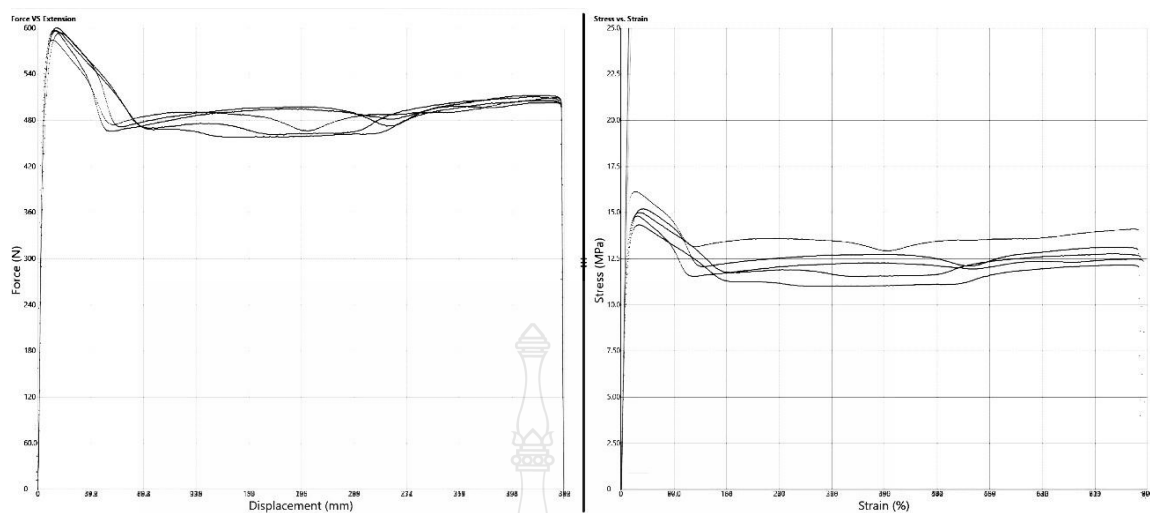
ภาพที่ ก.12 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/MMT 97/3
% โดยน้ำหนัก



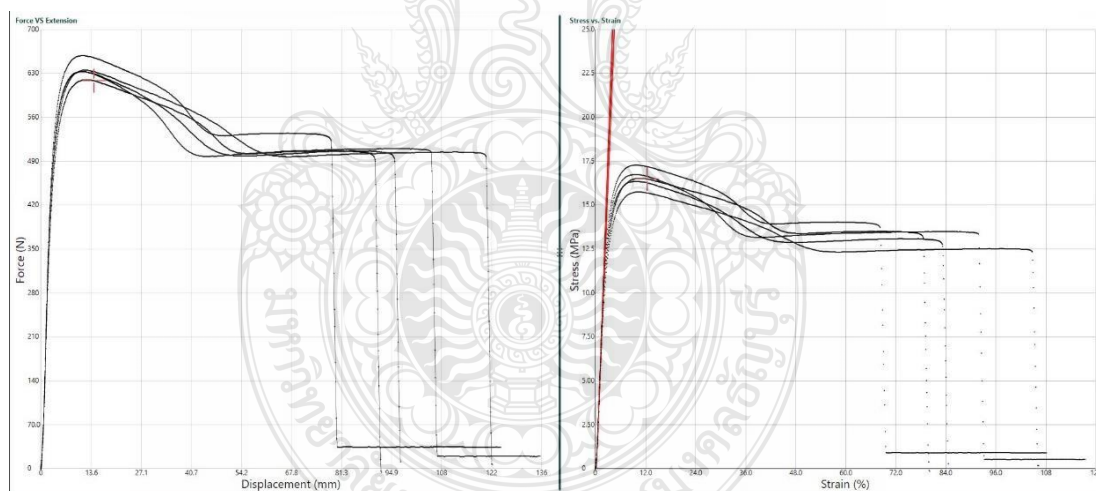
ภาพที่ ก.13 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/MMT 95/5
% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.14 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/MMT 90/10
% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.15 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/MMT 80/20
% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.16 กราฟการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/MMT 70/30
% โดยน้ำหนัก

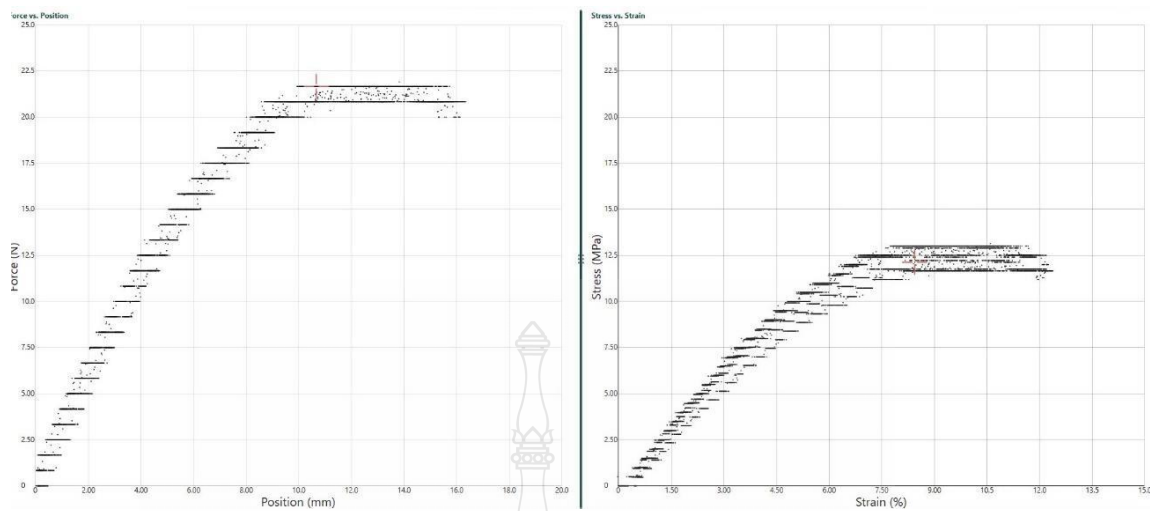
ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างค่าการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต
RF/HDPE/CaCO₃ RF/HDPE/WLT และ RF/HDPE/MMT

การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE/CaCO ₃ (wt %)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation At Break(%)
90/10	14.8	636	384
	15.1	655	378
	14.9	810	400
	14.8	737	424
	14.4	709	391
80/20	13.9	868	377
	14.7	769	382
	14.6	845	383
	14.5	786	384
	14.4	834	387
70/30	14.2	881	170
	14.2	897	177
	14.7	964	135
	14.6	959	121
	14.4	980	138

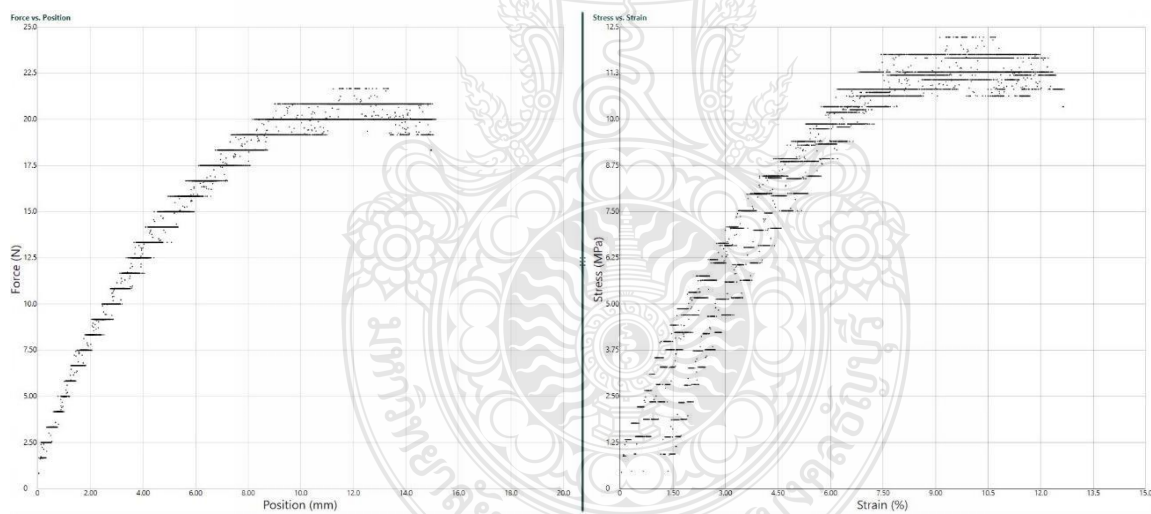
การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE/WLT (wt%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation At Break(%)
90/10	15.4	492	400
	15.9	491	337
	16.3	493	388
	15.3	518	397
	15.9	480	358
80/20	14.6	589	385
	14.1	564	317
	13.8	539	376
	13.7	517	376
	14.5	568	328
70/30	12.2	499	336
	14.3	645	293
	14.1	561	321
	13.6	635	307
	13.7	631	314

การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE/MMT (wt%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation At Break(%)
99/1	13.8	438	405
	14.8	435	395
	14.3	422	408
	13.9	390	395
	14.4	420	404

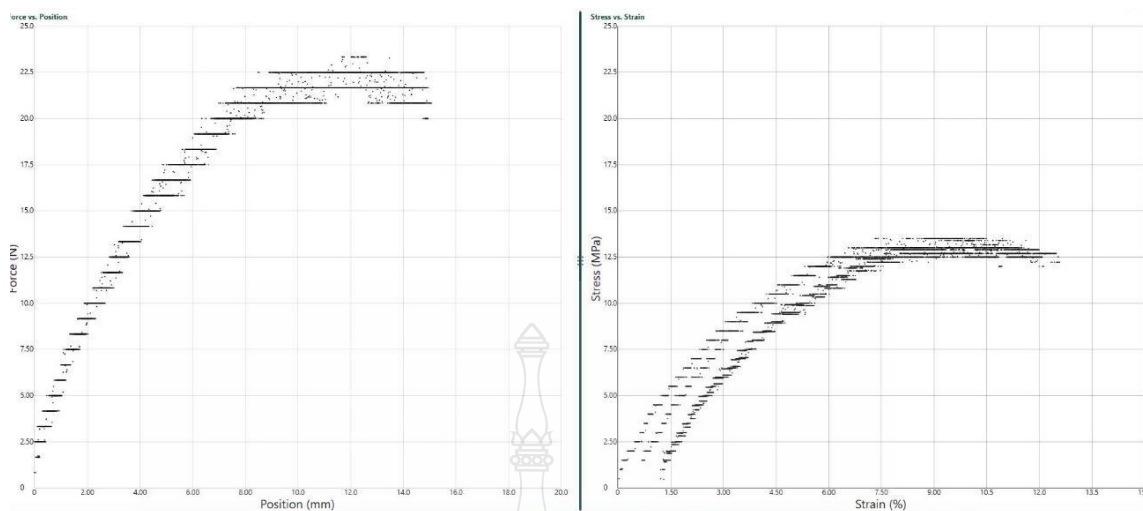
การผสมพอลิเมอร์ RF/HDPE/MMT (wt%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation At Break(%)
97/3	14.3	405	408
	13.9	427	411
	13.2	434	393
	14.1	416	390
	14.1	423	410
95/5	15.3	438	405
	14.8	411	400
	14.5	431	405
	15.1	435	408
	14.1	424	404
90/10	15.2	439	334
	15.5	442	312
	16.4	467	403
	15.5	448	309
	14.7	451	384
80/20	14.8	541	237
	15.2	527	224
	15.0	537	216
	14.3	543	227
	16.5	532	234
70/30	17.3	638	95
	17.1	634	96
	16.2	627	107
	15.9	645	105
	16.5	595	104



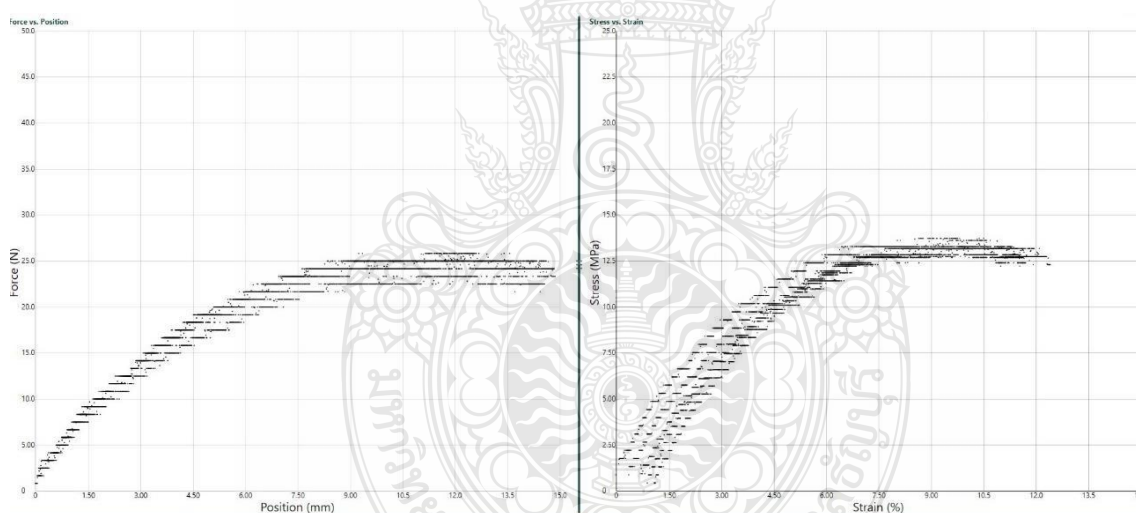
ภาพที่ ก.17 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF:HDPE 70:30 % โดยน้ำหนัก



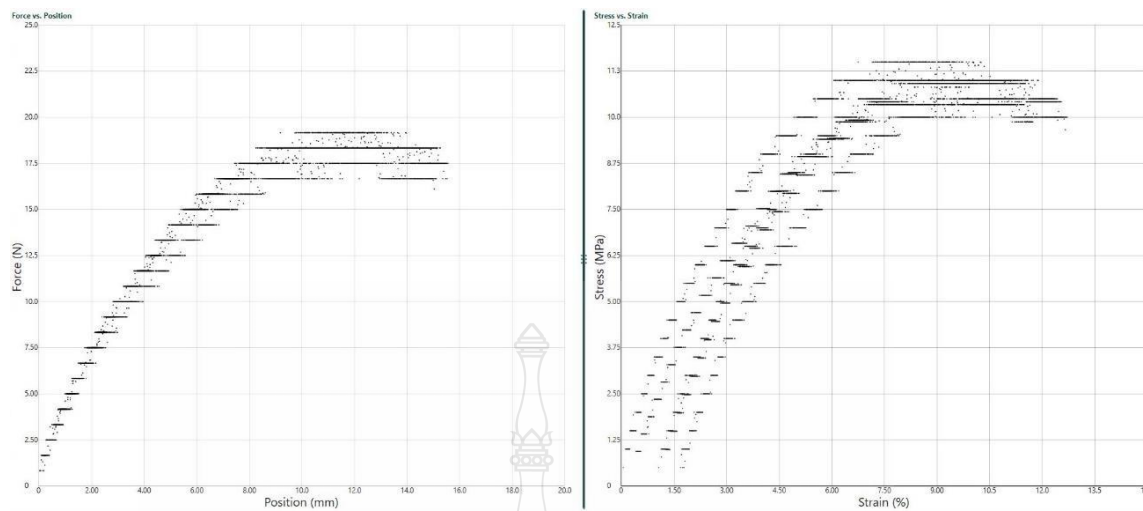
ภาพที่ ก.18 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):CaCO₃ 90:10 % โดยน้ำหนัก



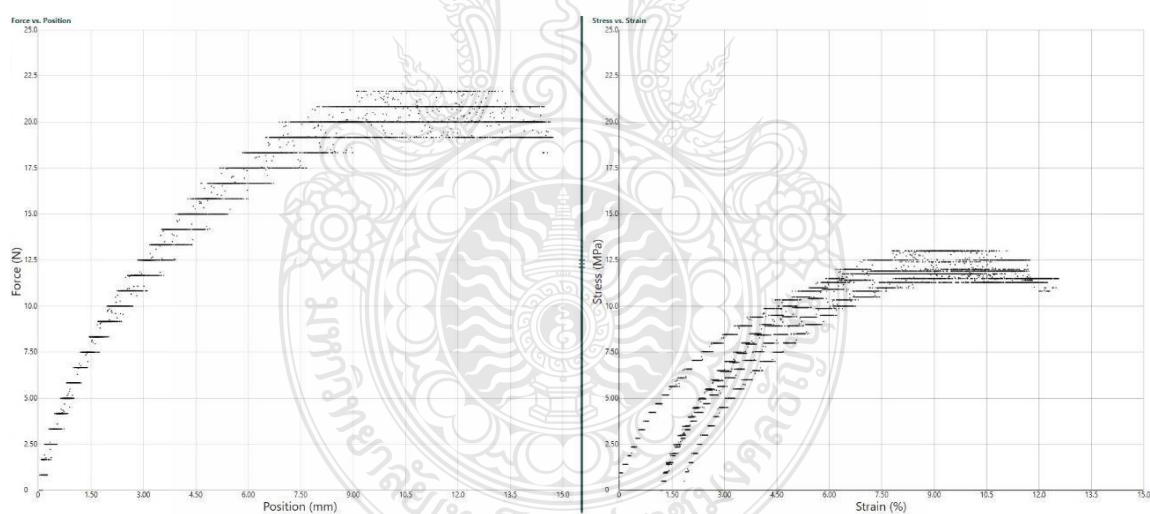
ภาพที่ ก.19 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):CaCO₃ 80:20
% โดยน้ำหนัก



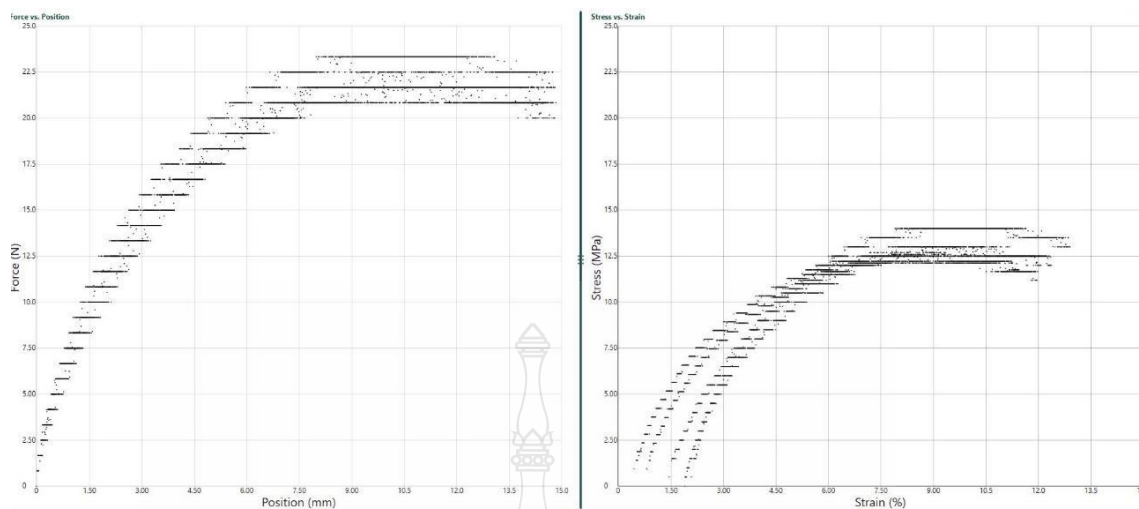
ภาพที่ ก.19 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):CaCO₃ 70:30
% โดยน้ำหนัก



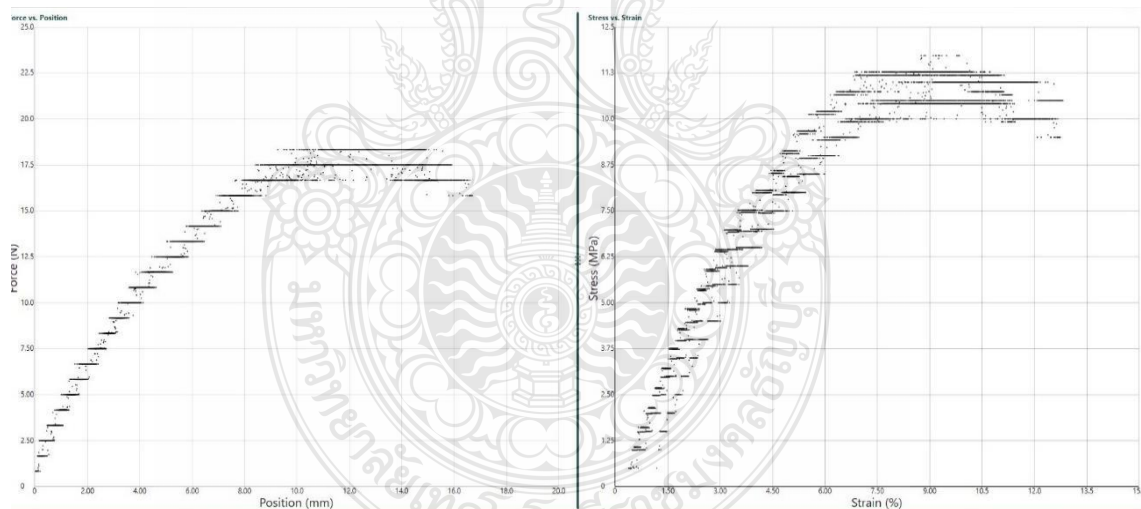
ภาพที่ ก.20 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):WLT 90:10
% โดยน้ำหนัก



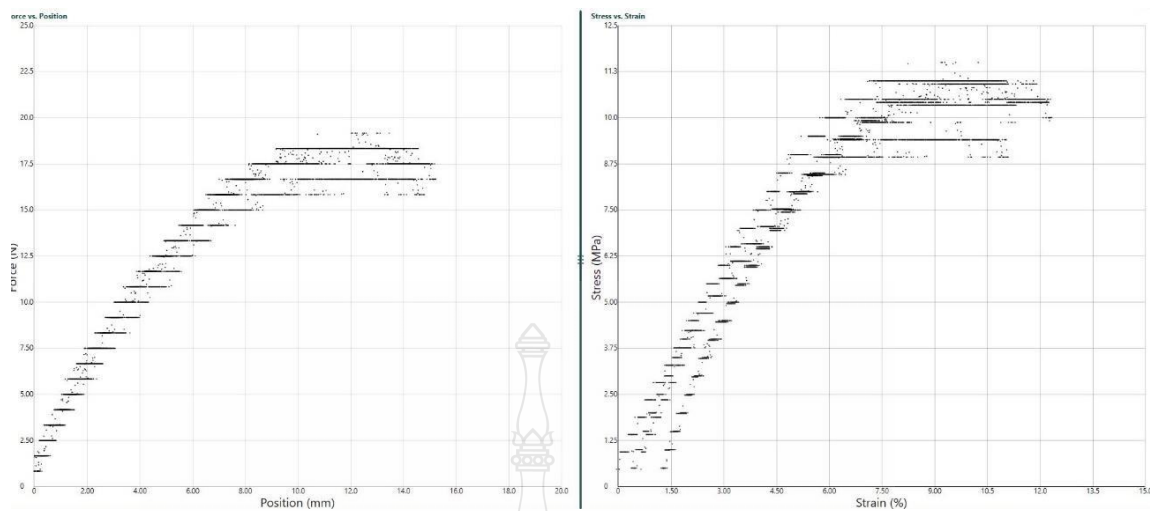
ภาพที่ ก.21 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):WLT 80:20
% โดยน้ำหนัก



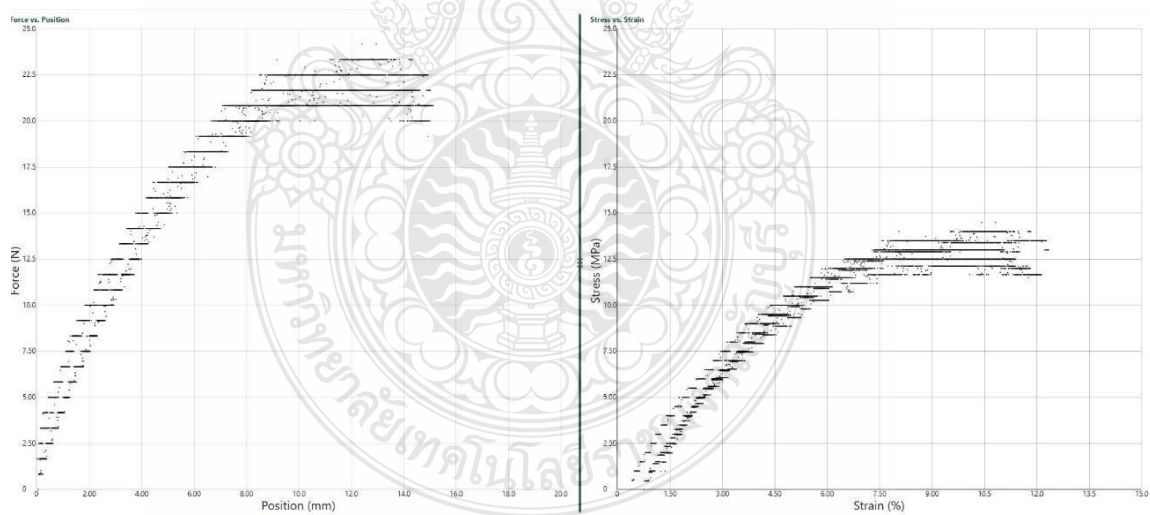
ภาพที่ ก.22 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):WLT 70:30
% โดยน้ำหนัก



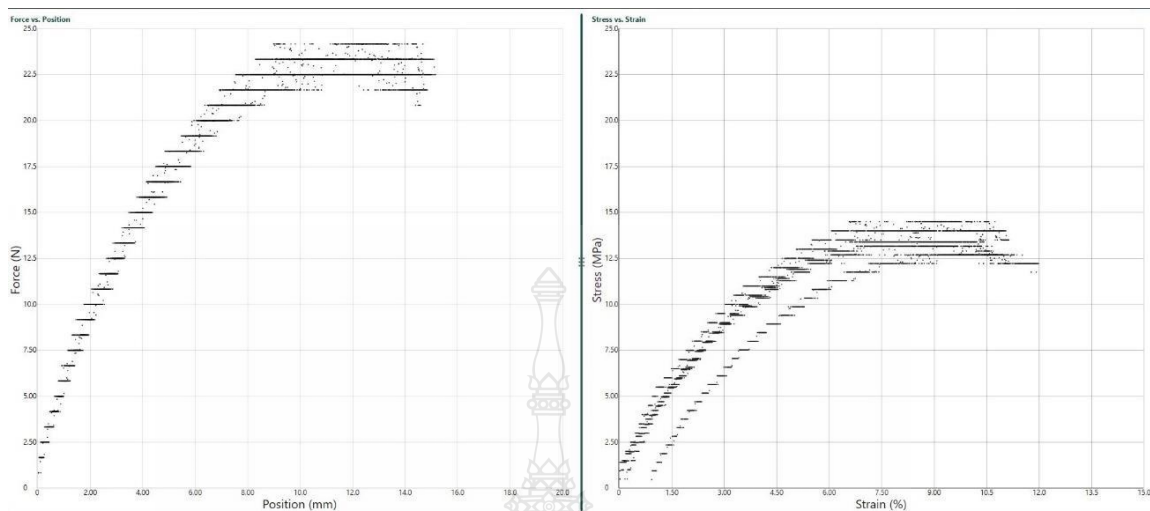
ภาพที่ ก.23 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):MMT 99:1
% โดยน้ำหนัก



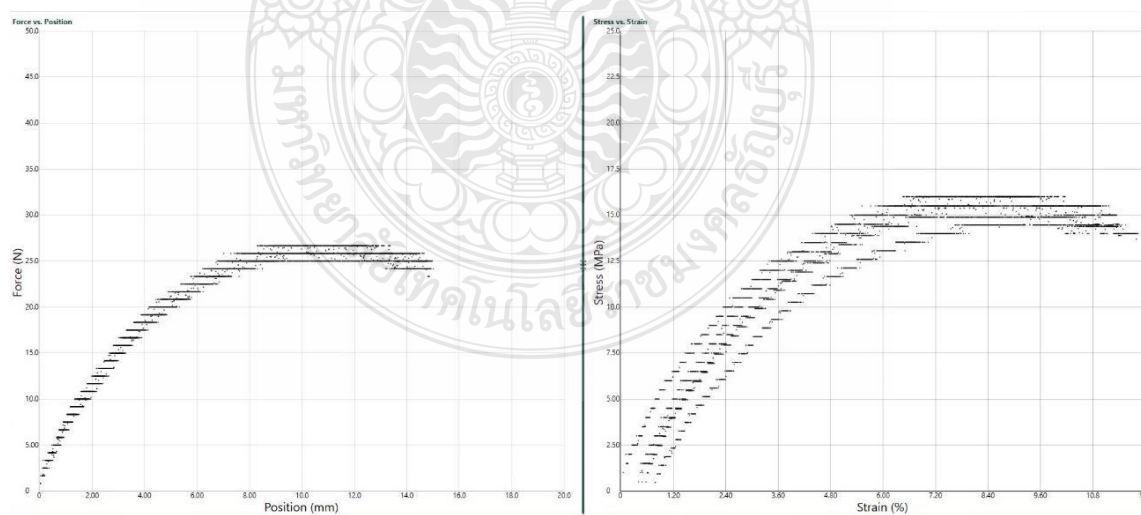
ภาพที่ ก.25 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):MMT 95:5
% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.26 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):MMT 90:10
% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.27 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/MMT 80/20 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก.28 กราฟการทนต่อแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):MMT 70:30 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างค่าการทนแรงดัดโค้ง ของพอลิเมอร์ผสม RF : HDPE และ พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (RF:HDPE):CaCO₃ (RF:HDPE):WLT และ (RF:HDPE):MMT

การผสมพอลิเมอร์ (wt %)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
(RF : HDPE) 70 : 30 (wt %)	12	180
	9.3	205
	10.2	211
	13	208
	10.2	204
(RF : HDPE) :CaCO ₃ 90:10 (wt %)	12.4	155
	12.4	253
	13.0	175
	13.0	211
	13.0	214
(RF : HDPE) :CaCO ₃ 80:20 (wt%)	13.5	208
	13.5	265
	13.9	196
	13.0	199
	13.5	241
(RF : HDPE) :CaCO ₃ 70:30 (wt%)	15.4	211
	13.9	243
	15	320
	15.4	229
	15.4	213

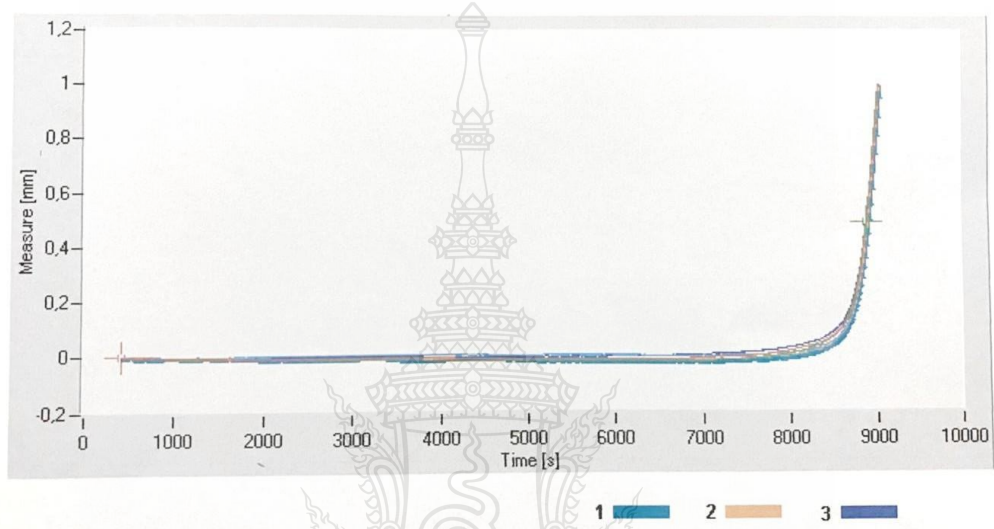
การผสมพอลิเมอร์ (wt %)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
(RF:HDPE):WLT 90:10 (wt%)	10.5	136
	11.5	166
	11.5	174
	11.5	222
	11.5	198
(RF:HDPE):WLT 80:20 (wt%)	12.0	162
	14.4	209
	13.0	216
	12.4	188
	13.0	170
(RF:HDPE):WLT 70:30 (wt%)	13.0	194
	13.5	282
	13.9	215
	13.0	213
	13.5	349
(RF:HDPE):MMT 99:1 (wt%)	11.0	161
	10.5	184
	10.9	209
	10.5	215
	10.9	201
(RF:HDPE):MMT 97:3 (wt%)	10.9	150
	10.9	153
	11.5	181
	11.5	202
	10.5	159

การผสมพอลิเมอร์ (wt %)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
(RF:HDPE):MMT 95:5 (wt%)	10.9	158
	10.9	155
	10.9	155
	11.5	163
	12	188
(RF:HDPE):MMT 90:10 (wt%)	13.9	209
	13.9	211
	13.0	206
	13.3	198
	13.5	245
(RF:HDPE):MMT 80:20 (wt%)	13.5	208
	13.8	350
	14.5	360
	14.5	376
	13.9	230
(RF:HDPE):MMT 70:30 (wt%)	16.0	263
	16.0	338
	16.0	377
	15.4	325
	16.0	280

ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติทางความร้อน

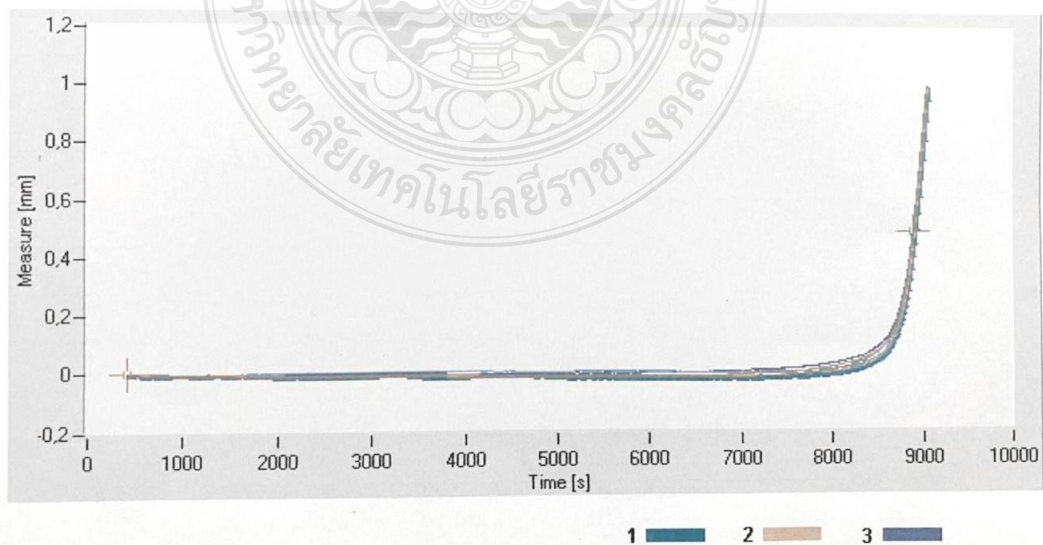
ผลการทดสอบอุณหภูมิการดัดงอจากความร้อน HDT (Heat distortion temperature)

Par: Name : LL/LD Date : 6/22/2021 2:02:01 PM
Parameters Par: Name : ProjectLL/LD Instrument : 20227
Operator :



ภาพที่ ข.1 กราฟแสดงผลการทดสอบของฟิล์มรีไซเคิล (RF)

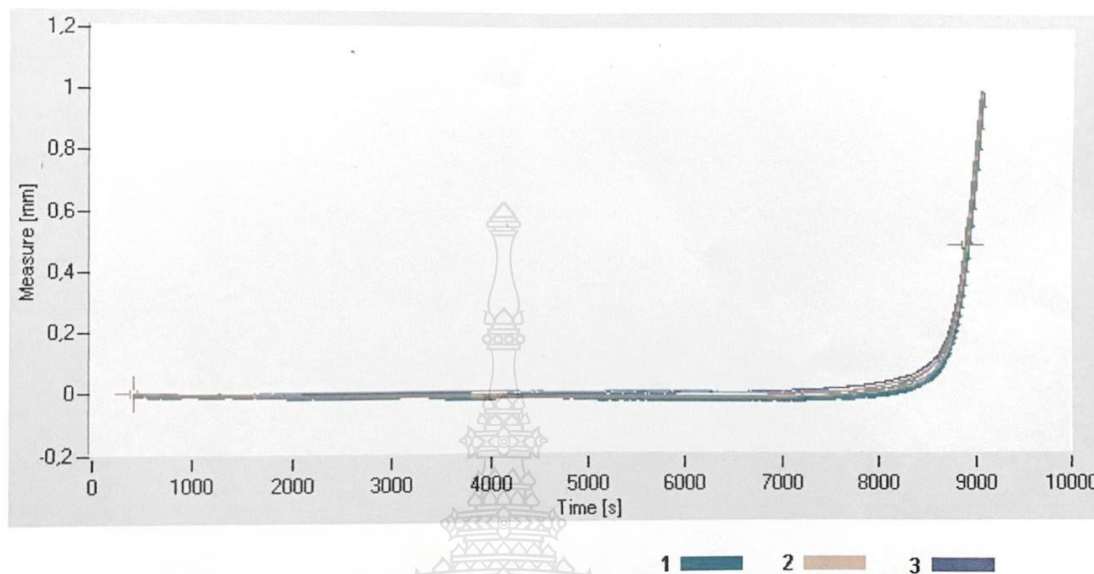
Par: Name : HDPE 100 Date : 6/28/2021 1:44:43 PM
Parameters Par: Name : ProjectLL/LD Instrument : 20227
Operator :



ภาพที่ ข.2 กราฟแสดงผลการทดสอบของ HDPE

Par: Name : LL/LD+HD70.30
 Parameters Par: Name : ProjectLL/LD
 Operator :

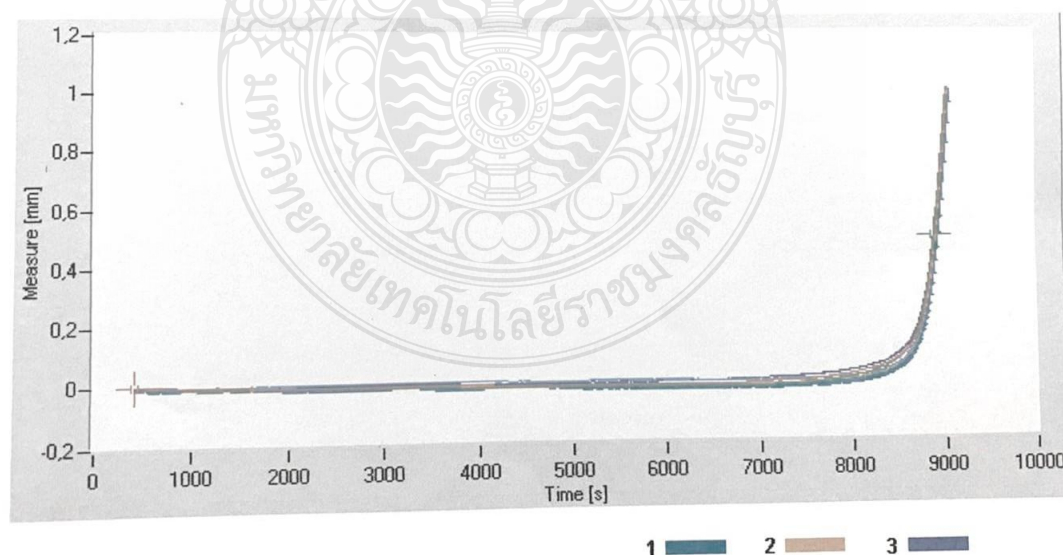
Date : 9/1/2021 10:42:15 AM
 Instrument : 20227



ภาพที่ ข.3 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE 70/30 (wt%)

Par: Name : CaCO3 90.10 áéäç
 Parameters Par: Name : ProjectLL/LD
 Operator :

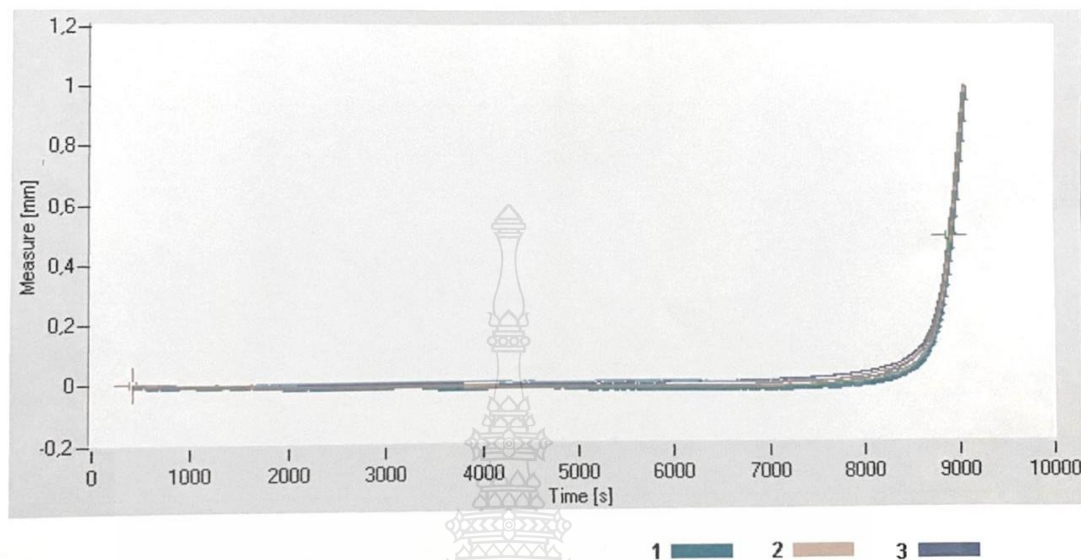
Date : 6/28/2021 2:53:15 PM
 Instrument : 20227



ภาพที่ ข.4 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/CaCO3 90/10 (wt%)

Par: Name : **CaCO₃ 80.20**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

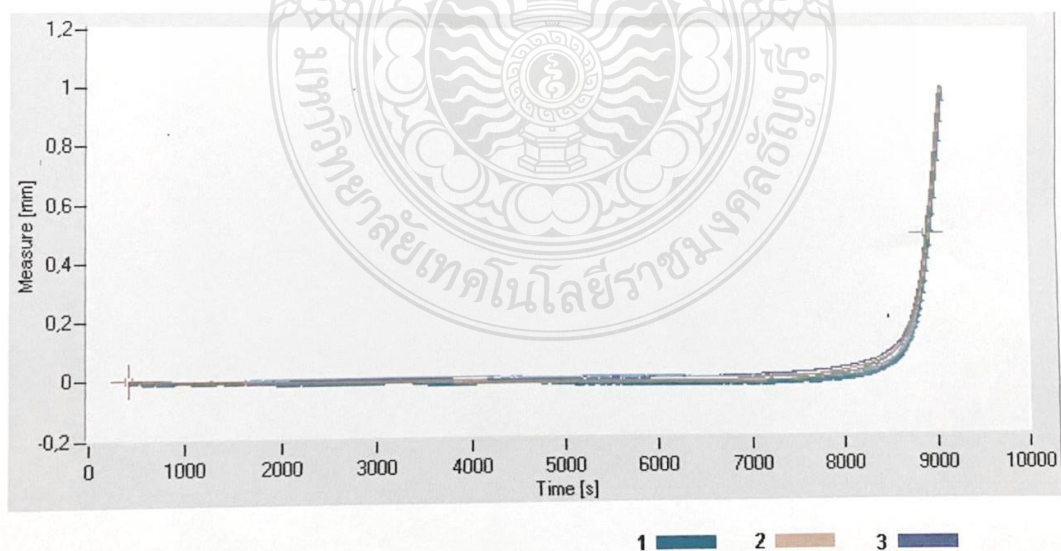
Date : **6/21/2021 1:15:12 PM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.5 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/CaCO₃ 80/20 (wt%)

Par: Name : **CaCO₃ 70:30 (new)**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

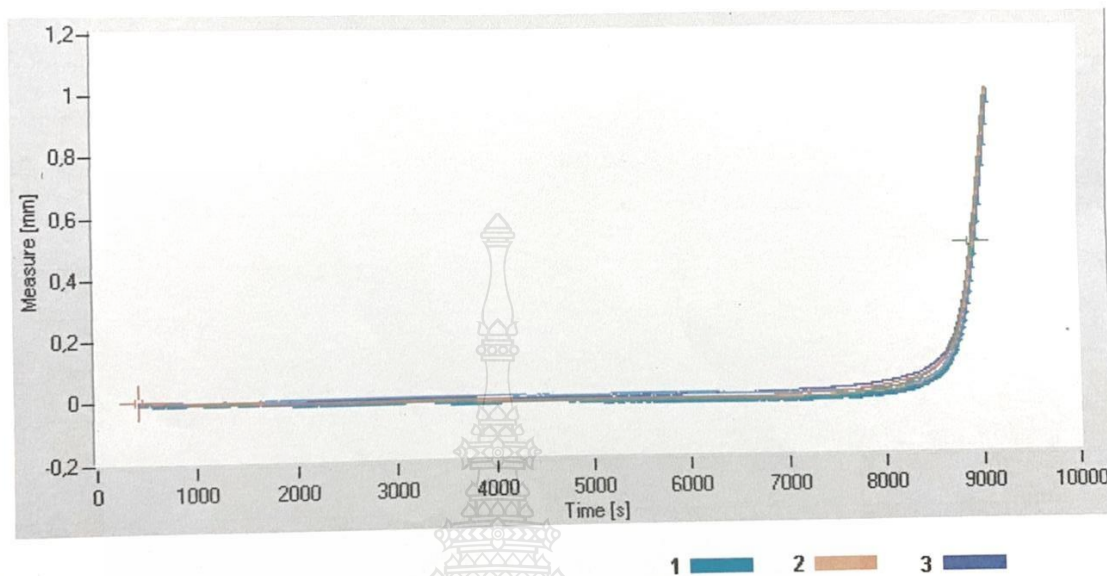
Date : **3/20/2021 10:27:49 AM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.6 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/CaCO₃ 70/30 (wt%)

Par: Name : **WLT 90.10**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

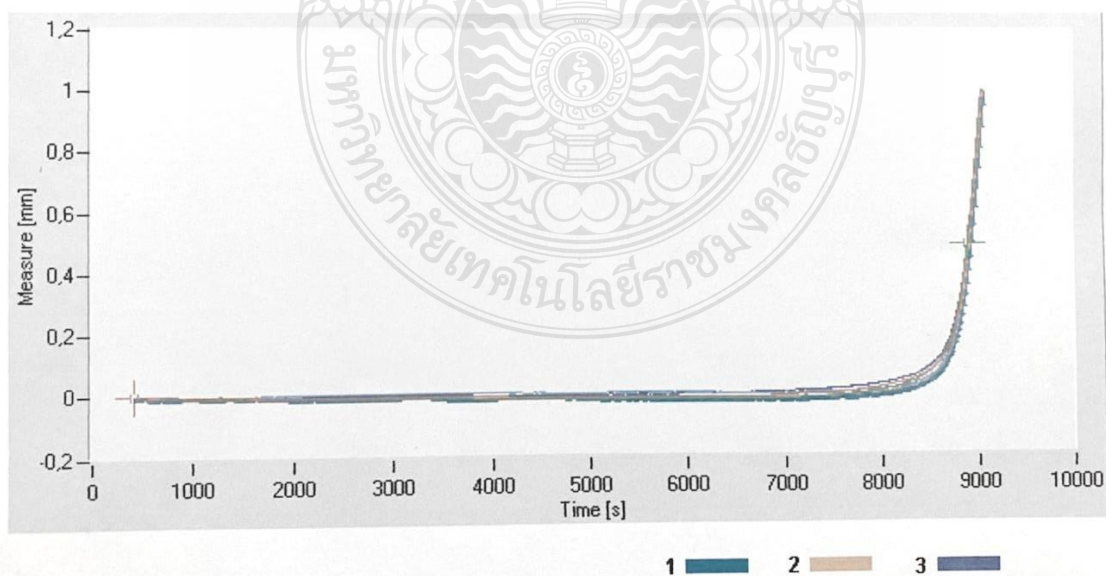
Date : **6/28/2021 9:57:37 AM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.7 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/WLT 90/10 (wt%)

Par: Name : **MMT 80:20**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

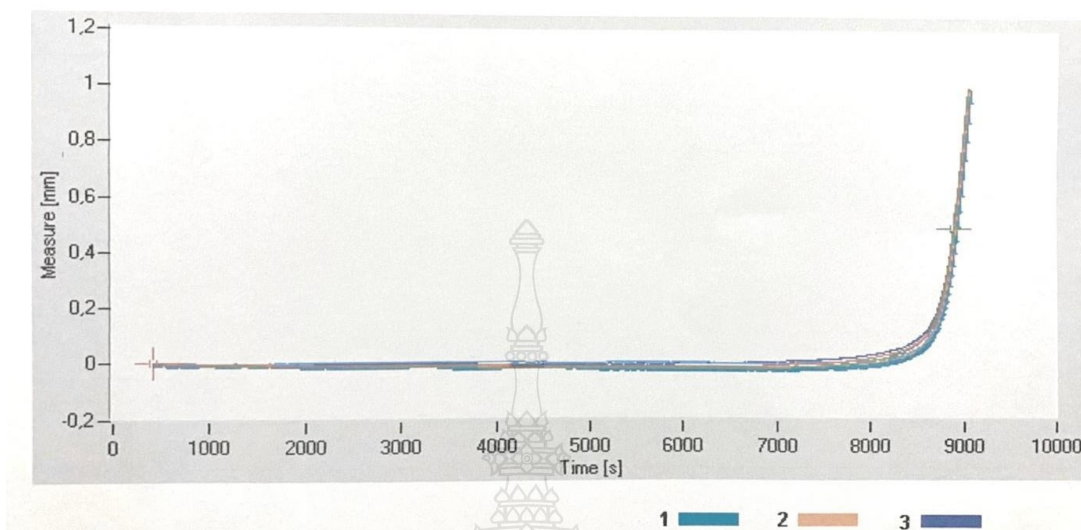
Date : **6/22/2021 11:16:41 AM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.8 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/WLT 70/30 (wt%)

Par: Name : **MMT 99.1**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

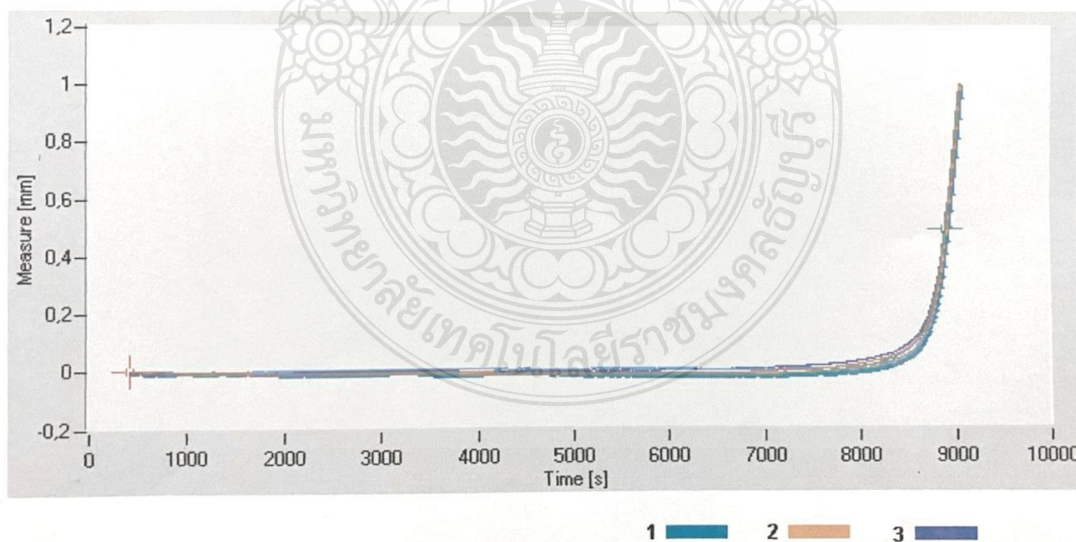
Date : **6/25/2021 9:48:58 AM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.9 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/MMT 99/1 (wt%)

Par: Name : **MMT 97.3**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

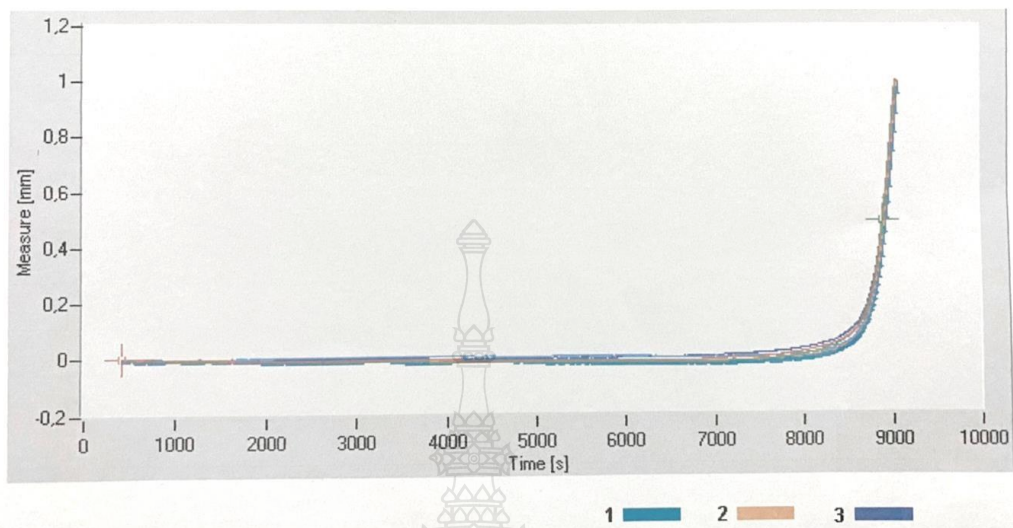
Date : **6/25/2021 11:41:33 AM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.10 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/MMT 97/3 (wt%)

Par: Name : **MMT 95.5**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

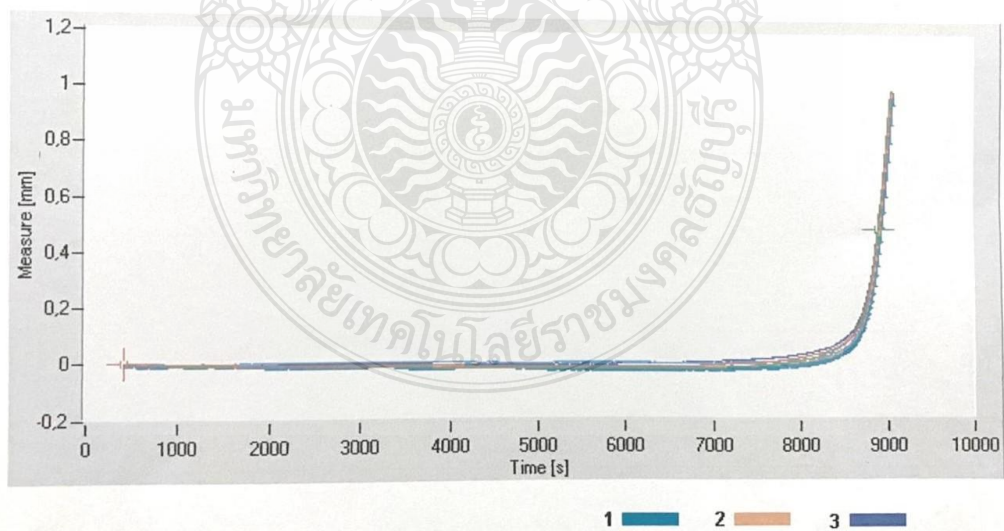
Date : **6/25/2021 12:51:28 PM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.11 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/MMT 95/5 (wt%)

Par: Name : **MMT 90.10**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

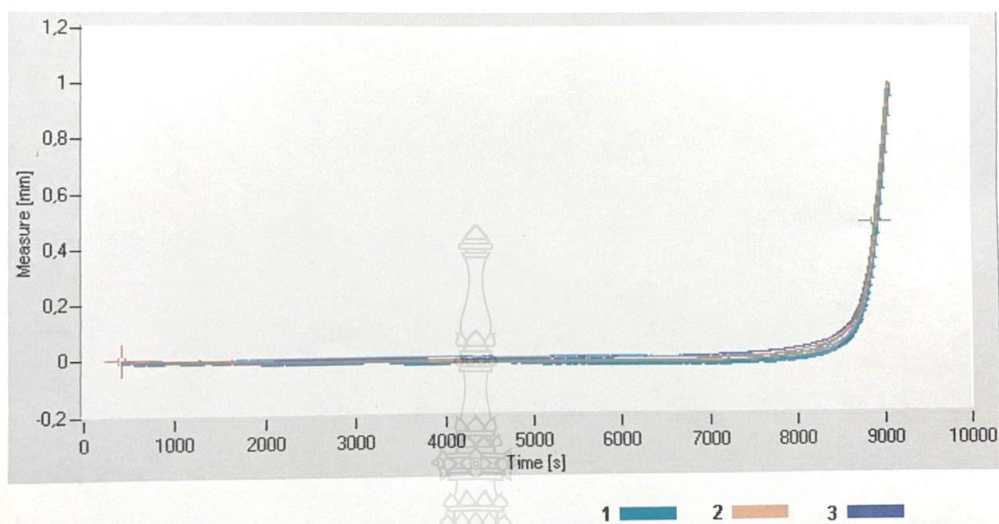
Date : **6/22/2021 9:55:06 AM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.12 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/MMT 90/10 (wt%)

Par: Name : **MMT 80:20**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

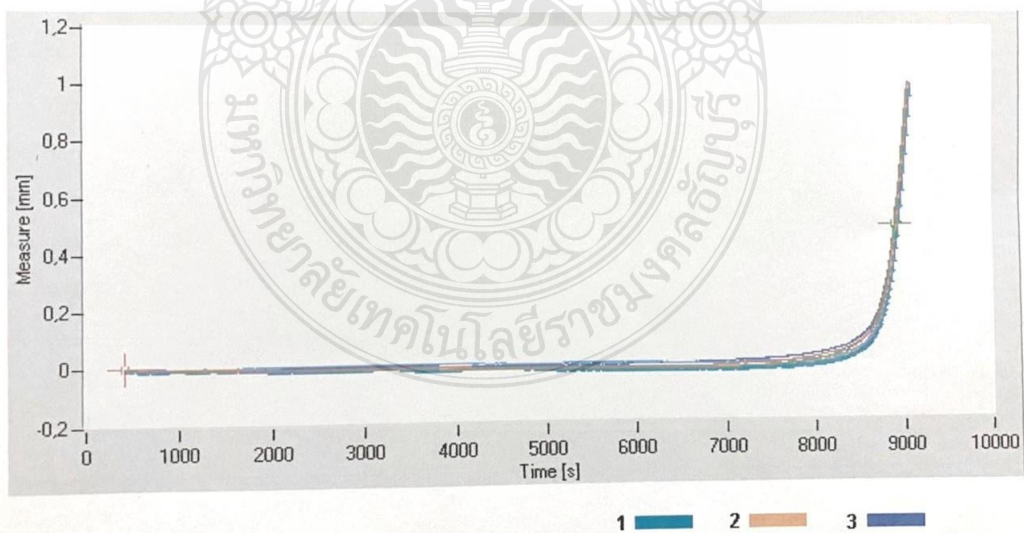
Date : **6/22/2021 11:16:41 AM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.13 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/MMT 80/20 (wt%)

Par: Name : **MMT 70:30**
 Parameters Par: Name : **ProjectLL/LD**
 Operator :

Date : **6/22/2021 12:40:54 PM**
 Instrument : **20227**



ภาพที่ ข.14 กราฟแสดงผลการทดสอบของ RF/HDPE/MMT 70/30 (wt%)

ภาคผนวก ค การทดสอบดัชนีการหลอมไหล

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม RF/HDPE และพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต RF/HDPE/CaCO₃ RF/HDPE/WLT และ RF/HDPE/MMT

การผสมพอลิเมอร์	MFI (g/10 นาที)
RF:HDPE 70:30 (wt%)	1.66
	1.57
	1.65
	1.75
	1.69
	1.67
	1.71
	1.68
	1.61
	1.75

พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	MFI (g/10 นาที)		
	90:10 (wt%)	80:20 (wt%)	70:30 (wt%)
(RF : HDPE) : CaCO ₃	1.5	1.3	1.2
	1.5	1.3	1.2
	1.4	1.3	1.3
	1.4	1.4	1.2
	1.5	1.4	1.2
	1.5	1.2	1.2
	1.4	1.4	1.1
	1.4	1.3	1.2
	1.5	1.3	1.2
	1.4	1.4	1.2

พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	MFI (g/10 นาที)		
	90:10 (wt%)	80:20 (wt%)	70:30 (wt%)
(RF:HDPE) : WLT	1.5	1.6	1.3
	1.6	1.5	1.2
	1.5	1.5	1.4
	1.5	1.5	1.3
	1.6	1.4	1.4
	1.6	1.6	1.2
	1.6	1.5	1.2
	1.6	1.5	1.2
	1.6	1.6	1.3
	1.5	1.7	1.2

พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	MFI (g/10 นาที)		
	99:1 (wt%)	97:3 (wt%)	95:5 (wt%)
(RF : HDPE) : MMT	1.5	1.5	1.4
	1.6	1.7	1.5
	1.5	1.4	1.4
	1.7	1.3	1.4
	1.5	1.4	1.5
	1.5	1.4	1.4
	1.5	1.3	1.4
	1.6	1.4	1.3
	1.6	1.3	1.4
	1.7	1.5	1.4

พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	MFI (g/10 นาที)		
	90:10 (wt%)	80:20 (wt%)	70:30 (wt%)
(RF : HDPE) : MMT	1.5	1.4	1.4
	1.6	1.7	1.5
	1.5	1.4	1.4
	1.6	1.3	1.4
	1.5	1.4	1.5
	1.5	1.5	1.3
	1.7	1.4	1.4
	1.6	1.3	1.4
	1.5	1.3	1.4
	1.7	1.5	1.4



ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ	นางสาวกัลยาณี ศรีวารินทร์
สังกัด	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ประวัติการศึกษา	วศ.บ วิศวกรรมพลาสติก ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำแหน่ง	นักวิชาการศึกษา
เบอร์โทร	025493480
Email	Kanlayanee_s@rmutt.ac.th

