



โครงการวิจัย เรื่อง

การศึกษาอิทธิพลของขี้ตะกั่วอลูมิเนียมจากโรงหล่อที่มีผลต่อสมบัติ
ของวัสดุผสมพอลิเมอร์-พื้นหลักพอลิพรอพิลีน

Influence Study of Aluminum Dross from Aluminum Casting
Factory on Polypropylene Matrix-Polymer Composite Materials

โดย

ผศ.ไพบุลย์ แยมเพื่อน
นายปราโมทย์ พูนนายม
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
งบประมาณประจำปี 2555

การศึกษาอิทธิพลของซีตากรันอูมิเนียมจากโรงหล่อที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสมพอลิเมอร์-พื้นหลักพอลิพรอพิลีน

งบประมาณประจำปี 2555





โครงการวิจัย เรื่อง

การศึกษาอิทธิพลของขี้ตะกรันอลูมิเนียมจากโรงหล่อที่มีผลต่อสมบัติ
ของวัสดุผสมพอลิเมอร์-พื่นหลักพอลิพรอพิลีน

Influence Study of Aluminum Dross from Aluminum Casting
Factory on Polypropylene Matrix-Polymer Composite Materials

โดย

ผศ.ไพบุลย์ แยมเพื่อน
นายปราโมทย์ พูนนายม
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
งบประมาณประจำปี 2555

ผู้วิจัย : ผศ.ไพบูลย์ แยมเผื่อน
ปราโมทย์ พูนนายม
ผศ.ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ชื่องานวิจัย : การศึกษาอิทธิพลของซีตะกัณอะลูมิเนียมจากโรงหล่อที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม
พอลิเมอร์-พื้นหลักพอลิพรอพิลีน

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

ซีตะกัณอะลูมิเนียมเป็นขยะอุตสาหกรรมที่เกิดจากกระบวนการหล่อ โดยซีตะกัณอะลูมิเนียมเหล่านี้จะมีการนำกลับไปใช้ประโยชน์น้อย ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าได้มีการนำวัสดุต่างๆมาผสมในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆให้กับพอลิเมอร์ โดยเฉพาะการผสมผงวัสดุประเภทโลหะลงในพอลิเมอร์จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำซีตะกัณอะลูมิเนียมนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำไปผสมกับพอลิเมอร์ นอกจากจะได้วัสดุผสมชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ดีขึ้นจากเดิมแล้ว ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะอุตสาหกรรมอีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาทดลองนำซีตะกัณอะลูมิเนียมมาเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิพรอพิลีน โดยการนำซีตะกัณอะลูมิเนียมไปบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดลดขนาดวัตถุด้วยลูกบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า $75 \mu\text{m}$ จากนั้นมาผสมกับพอลิพรอพิลีน ด้วยขบวนการผสมแบบหลอมละลายโดยการผสมในเครื่องผสมภายใน ที่สัดส่วนการผสมซีตะกัณอะลูมิเนียมในพอลิพรอพิลีน 1, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ แล้วทดสอบสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางความร้อน

การวิจัยพบว่าซีตะกัณอะลูมิเนียมสามารถนำมาเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิพรอพิลีนได้ โดยซีตะกัณอะลูมิเนียมที่แทรกตัวอยู่ในพอลิพรอพิลีนทำให้พอลิพรอพิลีนมีสีเข้มขึ้นเป็นสีเทา เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าซีตะกัณอะลูมิเนียมส่งผลให้ ค่าความแข็งแรง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าการต้านทานการเสียดทาน ของพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีตะกัณอะลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้น แต่จะมีความสามารถในการยึดตัวต่ำลง ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซีตะกัณอะลูมิเนียมส่งผลให้พอลิพรอพิลีนเกิดผลึกมากขึ้นโดยอุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 117 -122 องศาเซลเซียส ส่งผลให้วัสดุผสมที่ได้มีสมบัติไปในทางที่มีความแข็งแรงมากขึ้น

คำสำคัญ : อะลูมิเนียมออกไซด์, ซีตะกัณอะลูมิเนียม, พอลิพรอพิลีน, วัสดุผสม

Name : Assist. Prof. Paiboon Yaemporn
Mr.Pramote Poonayam
Assist. Prof. Kittipong Kimapong, Ph.D.

Research : Influence Study of Aluminum Dross from Aluminum Casting
Title *Factory on Polypropylene Matrix-Polymer Composite Materials*

หน่วยงาน : Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

The aluminum dross is industrial waste of casting process. Its them will now be reuse less. Form a study found that application materials are mixed in the polymer for add more properties. Especially mixed material type powder metal in the polymer resulting have a hardness properties higher. The researcher then had the idea to bring this playful dross utilization by apply mixed with polymer. Except to be the new composites with better property, it also helps reducing the environment problem form industrial wastes as well

This research is to study on experiment use aluminum dross reinforce in polypropylene by that crushing them by the process called ball mill to the particle size minor than 75 μm , then take them as the filler in to the polymer by blending them with polypropylene. The process is called melt blending process, using internal mixer at content dross 1, 3, 5, 7 and 9% by weight, then is forming to testing specimen for testing mechanical properties, microstructure and thermal properties

Research is found aluminum dross can use reinforcing material for polypropylene by aluminum dross is to mixed in polypropylene revealed that the color of composites changes to grey color. The testing of mechanical properties is found that hardness, modulus of elasticity and resistance abrasion value became higher of polypropylene are higher becomes of being mixed of aluminum dross but elongation is lower. The yield stress does not change. The testing of thermal properties is found that melting temperature does not change but crystallization became higher by recrystallization temperature in the range of 117 -122 $^{\circ}\text{C}$ effected in composites to have more rigid properties.

Keywords : Aluminum Oxide, Dross, Polypropylene, Composites

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2555 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการ และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทดลอง ทำให้การทดลองสามารถดำเนินการไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้าย คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน จนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสในการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับการงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบแต่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ไพบุลย์ แยมเพื่อน
ปราโมทย์ พูนนายม
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเมอร์	4
2.2 สารตัวเติม	10
2.3 การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม	14
2.4 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อกระบวนการผลิต	14
2.5 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์	16
2.6 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์	22
2.7 การบดและการคัดแยกขนาด	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	31
3.1 แผนภาพการไหลของขั้นตอนการวิจัย	31
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ	32
3.3 สารตัวเติม	32
3.4 การผสมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีน และพอลีพรอพิลีน กับสารตัวเติม	33
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล	39
3.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนจากเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)	44
3.7 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	46
4.1 สารตัวเติมขึ้นตระกัณอะลูมิเนียม	46
4.2 อิทธิพลของปริมาณขึ้นตระกัณอะลูมิเนียมที่มีผลต่อ สมบัติทางกายภาพ	48
4.3 อิทธิพลของปริมาณขึ้นตระกัณอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกล	51
4.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับขึ้นตระกัณอะลูมิเนียม	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผล	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	67



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติของพอลิพรอพิลีน	8
2.2	ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์	9
2.3	คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์	11
3.1	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	29
3.2	สมบัติของเม็ดพลาสติก	29
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.4	เครื่องทดสอบความแข็ง Shore Durometer ชนิด A และ D	42



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	4
2.3	5
2.4	7
2.5	8
2.6	14
2.7	17
2.8	18
2.9	19
2.10	19
2.11	22
2.12	23
2.13	23
2.14	24
3.1	28
3.2	29
3.3	31
3.4	31
3.5	31
3.6	32
3.7	32
3.8	32
3.9	33
3.10	34
3.11	34
3.12	34
3.13	35
3.14	35
3.15	35
3.16	36
3.17	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.18	พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียม 7 wt%	36
3.19	ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงดึงตาม ASTM D 638 type IV	37
3.20	แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV	37
3.21	เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	38
3.22	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV	38
3.23	ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบความเสียดทานตาม DIN 53516	38
3.24	แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516	39
3.25	ชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516	39
3.26	ลักษณะของมูมียัลด์ที่ใช้กำหนดจุดความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก	40
3.27	ลักษณะของกราฟที่ใช้ในการคำนวณหา Initial Maximum Modulus	40
3.28	เครื่องทดสอบแรงดึง	41
3.29	การทดสอบแรงดึง	41
3.30	ชิ้นงานทดสอบจากการทดสอบแรงดึง	41
3.31	เครื่องทดสอบความแข็งชอร์ดูโรมิเตอร์แบบสเกลดี	43
3.32	การวัดค่าความแข็ง	43
3.33	เครื่องทดสอบความเสียดทาน	44
3.34	เครื่องทดสอบความเสียดทาน	44
3.35	การจับชิ้นงานทดสอบความเสียดทาน	45
4.1	ซีตตระกรันอะลูมิเนียมขนาด $75\mu\text{m}$ ที่ได้จากการบดและคัด	46
4.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดจากเครื่องมาสเตอร์ไซตเซออร์ เอส	47
4.3	ส่วนประกอบทางเคมีหลักของซีตตระกรันอะลูมิเนียม (Dross)	48
4.4	ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณการผสมที่สัดส่วนต่างๆ	49
4.5	อุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ	50
4.6	อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมสัดส่วนต่างๆ	50
4.7	มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	51
4.8	ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	52
4.9	การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	53
4.10	ความแข็งของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	54
4.11	น้ำหนักที่ลดลงจากการทดสอบความเสียดทานของพอลิพรอพิลีนที่ปริมาณการผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุผสม (Composite materials) เป็นชนิดของวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของวัสดุ หรือเฟส ที่มากกว่าสองชนิดขึ้นไป เพื่อให้เกิดสมบัติที่ไม่สามารถพบได้ในวัสดุเพียงชนิดเดียว วัสดุผสมอาจจะเกิดจากการเลือกวัสดุหลายชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่โดดเด่นทางด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรง น้ำหนัก ความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ความสามารถต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรง และ สมบัติการนำไฟฟ้า จุดเด่นของวัสดุผสมอยู่ที่การนำวัสดุที่มีความแตกต่างกันมาผสมกันแล้วสามารถทำให้มีสมบัติที่เป็นแบบเดียวกันได้อย่างกลมกลืน [1]

ในปัจจุบัน วัสดุผสมพอลิเมอร์ (Polymer composite) มีการประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในการผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรม [2] ทำให้การคิดค้นรูปแบบของวัสดุผสมพอลิเมอร์แบบใหม่มีการ พัฒนาอย่างต่อเนื่องในงานวิศวกรรม โดยมีพื้นฐานหลักเป็นพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ และนำวัสดุกลุ่มอื่นๆ เข้า มาผสม หนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมที่นิยมมาทำเป็นพื้นหลัก คือ พอลิพรอพิลีน (Polypropylene-PP) เป็น พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีลักษณะขาวขุ่นทึบแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุนตัวได้ ไม่มี กลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ ง่ายมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ ทนความร้อนได้ดี ในรูปของเส้นใยรับแรงดึงได้สูง ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมายเช่น ถุงบรรจุอาหารร้อน พลาสติกหุ้มซองบุหรี่ ระเบิด สายไฟฟ้า สายเคเบิล กล่อง แบตเตอรี่ ถังดับน้ำ ฝาปิดโถส้วม หมวกกันน็อค ฯลฯ หากมีการนำเติมวัสดุกลุ่มอื่นๆ เช่น โลหะเข้าไป ผสมในพื้นหลักของอลูมิเนียมจะทำให้เกิดสมบัติที่มีการปรับปรุงในทางที่ดีขึ้น

โลหะเป็นวัสดุกลุ่มที่มีการนำไปผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเกิดเป็นวัสดุผสม หนึ่งในโลหะที่มีความ สำคัญและมีการใช้งานมากในปัจจุบัน คือ อลูมิเนียม อลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองในโลก และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน [3] นอกจากนั้นอลูมิเนียมเป็น โลหะที่พบในชีวิตประจำวันและใช้ในงานต่าง ๆ มาก รองจากเหล็กและทองแดง เช่น ใช้ทำภาชนะใน คริวเรือน ของใช้อื่น ๆ และวัสดุก่อสร้าง อลูมิเนียมเป็นโลหะที่นำไปใช้แทนเหล็กและทองแดงมากขึ้นทุก ที่ โดยข้อดีของอลูมิเนียมคือเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาว่าเหล็กและทองแดง มีราคาถูกและไม่เกิดสนิม [4] ในกระบวนการหล่ออลูมิเนียม มีขั้นตอนเริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่อลูมิเนียมจนกระทั่งอลูมิเนียม หลอมละลาย จากนั้นก่อนการทำให้อลูมิเนียมผลอมเหลวเกิดการแข็งตัวต้องมีการทำให้อลูมิเนียม เกิดความบริสุทธิ์ ขั้นตอนการทำบริสุทธิ์สามารถทำได้โดยการเติมตัวกำจัดสารมลทินลงไปในอลูมิเนียม หลอมเหลว เพื่อทำการแยกสารมลทินออกจากอลูมิเนียมบริสุทธิ์ สารมลทินนี้จะลอยตัวปกคลุม ผิว หน้าของอลูมิเนียมหลอมเหลว เรียกว่า อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide, Al_2O_3) หรือเก้ลลอย (Dross) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการหลอมอลูมิเนียม โดยอลูมิเนียมออกไซด์ ส่วนนี้ไม่มีการนำกลับไปใช้ใหม่ ส่วนมากถูกนำไปฝังกลบจึงเป็นวัสดุที่ต้องถูกนำไปทิ้งหรือกำจัดโดยเปล่า ประโยชน์

ด้วยเหตุนี้ หากมีการวิเคราะห์สมบัติของ ชีตะแกรงอลูมิเนียมและนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำอลูมิเนียมออกไซด์ไปบดให้เป็นผงแล้วนำมาผสมกับพอลิเมอร์ อาจทำให้เกิดวัสดุผสมพอลิ เมอร์ ชนิดใหม่ที่ใช้วัตถุดิบจาก ชีตะแกรงอลูมิเนียมที่เป็นวัสดุเหลือใช้ในโรงงานหล่ออลูมิเนียม ที่อาจ ส่งผลกระทบต่อต้นทุนและเพิ่มมูลค่าของอุตสาหกรรมงานหล่อและอุตสาหกรรมพอลิเมอร์มากยิ่งขึ้น

เนื่องจากการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ เป็นการลดต้นทุนการผลิต ส่งผลให้เกิดการแข่งขันในอุตสาหกรรมพลาสติกเป็นไปได้ด้วยดี และลดปริมาณการใช้น้ำมันรวม ทั้งทรัพยากรธรรมชาติได้อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ ชีตะกัณอะลูมิเนียมจากการหล่ออะลูมิเนียมผลิตมาทำการผลิตวัสดุผสม

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของ ชีตะกัณอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม

1.2.3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิพรอพิลีน โดยผสมชีตะกัณอะลูมิเนียมลงในพอลิพรอพิลีนที่สัดส่วน 1, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนัก

1.3.2 ชีตะกัณอะลูมิเนียมที่ใช้ในการผสม มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 μm ซึ่งคัดแยกขนาดจากตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve) ขนาด 200 เมช (Mesh)

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน ก. อุณหภูมิหลอมเหลว ข. อุณหภูมิการเกิดผลึก

1.3.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)

1.3.5 ศึกษาสมบัติทางเชิงกล

ก. ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) (ASTM D 638)

- โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

- เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

- ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield Stress)

ข. การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) (ASTM D 2240)

ค. การทดสอบความเสียดทาน (Abrasion Testing) (DIN 53516)

1.4 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลสำเร็จแนวคิดเบื้องต้น ในการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้จากกระบวนการหล่ออะลูมิเนียมมาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อการผลิตวัสดุผสมพอลิเมอร์ เพื่อเป็นทางเลือกในการลดขยะอุตสาหกรรม และคาดว่าจะนำไปสู่การวิจัยในระยะต่อไป

1.4.2 ผลสำเร็จในการผลิตวัสดุผสมพอลิเมอร์ที่วัสดุเหลือใช้จากใช้งานอุตสาหกรรม ที่มีมูลค่าเท่ากับศูนย์ในกระบวนการหล่อ ซึ่งเป็นการคิดค้นแบบใหม่ ที่ยังไม่มีการทำวิจัยและรายงานในอดีต

1.4.3 ผลสำเร็จที่ได้ในโครงการนี้จะ เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงกระบวนการผลิตวัสดุผสมพอลิเมอร์ที่มีคุณภาพ ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ในงานอุตสาหกรรม และเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และสมบัติของ พอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสแลคของอะลูมิเนียม ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังนั้นจะนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับพอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่พอลิพรอพิลีนสารตัวเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ อิทธิพลของสารตัวเติมต่อโครงสร้าง กระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิเมอร์ และกล่าวถึงพอลิพรอพิลีนซึ่งใช้ในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมต่อโครงสร้างผลึก รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 พอลิเมอร์ (Polymer) [4]

ความหมายของพอลิเมอร์นั้นก็มาจากรากศัพท์กรีกสำคัญ 2 คำ คือ Poly (จำนวนมาก) และ Meros (ส่วน หรือ หน่วย) พอลิเมอร์เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) พอลิเมอร์จะประกอบไปด้วยหน่วยซ้ำกัน (Repeating unit) ของมอนอเมอร์ (Monomer) หลายๆหน่วยมาทำปฏิกิริยากัน มอนอเมอร์นี้จัดเป็นสารโมเลกุลเล็ก (Micromolecule) ชนิดหนึ่ง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมด จัดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ถ้ามีมอนอเมอร์ต่างกันตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป จัดเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) สารบางอย่างที่มีสมบัติอย่างพอลิเมอร์ เช่น สารพวกไขมันที่มีแต่หน่วยที่ไม่ซ้ำกันนั้นจะเป็นเพียงแค่สารแมคโครโมเลกุลเท่านั้น ไม่จัดเป็นพอลิเมอร์

พอลิเมอร์มีทั้งที่เกิดเองในธรรมชาติ (Natural Polymer) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer) ตัวอย่างของ โพลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส โปรตีน กรดนิวคลีอิก และยางธรรมชาติ ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก เส้นใย โฟม และกาว พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เข้ามามีบทบาทมากในชีวิตประจำวัน เราต้องใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์เพราะพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีสมบัติต่างกัน จึงนำหน้าที่หรือนำไปใช้งานที่ต่างกันได้

พอลิเมอร์ที่เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดคือพลาสติก ซึ่งเป็นคำที่ใช้อ้างถึงกลุ่มของวัสดุธรรมชาติและสังเคราะห์กลุ่มใหญ่ที่มีคุณสมบัติและการใช้งานต่างกัน พอลิเมอร์ธรรมชาติเช่นเซลลูลอสและแป้งที่ใช้มาเป็นเวลากว่าศตวรรษ พอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น โปรตีนและกรดนิวคลีอิกที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางชีวภาพ พอลิเมอร์ธรรมชาติอื่นๆ เช่นเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษและไม้ พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ บากาไลต์, นีโอพรีน, ไนลอน, พีวีซี, พอลิสไตรีน, พอลิเอทิลีน ไตรล และพีวีบี การศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ได้แก่ เคมีพอลิเมอร์, ฟิสิกส์พอลิเมอร์และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

พอลิเมอร์สังเคราะห์ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกือบทุกชนิด พอลิเมอร์มีการใช้ในการยึดเกาะและการหล่อลื่นอย่างกว้างขวาง เช่นเดียวกับการใช้เป็นโครงสร้างตั้งแต่ของเด็กเล่นจนถึงยานอวกาศ มีการใช้เป็นยาทางชีวภาพในฐานะเป็นตัวขนส่งยาในสิ่งมีชีวิต พอลิเมอร์เช่น พอลิ เมทิล เมทาคริเลต ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตเรซิสในอุตสาหกรรมกึ่งตัวนำ และสารไดอิเล็กทริกไปแทสเซียมต่ำสำหรับใช้ในคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง ปัจจุบันยังมีการพัฒนาพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นได้สำหรับอิเล็กทรอนิกส์

2.1.1 โครงสร้างของพอลิเมอร์ [4]

คุณสมบัติทางโครงสร้างของพอลิเมอร์เกี่ยวข้องกับการจัดตัวทางกายภาพของลำดับโมโนเมอร์ตลอดแกนหลักของสาย โครงสร้างที่อิทธิพลต่อคุณสมบัติอื่นๆ ของพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์สายตรงอาจจะละลายหรือไม่ละลายในน้ำขึ้นกับว่าหน่วยย่อยนั้นมีขั้วหรือไม่ แต่ในกรณีของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติสองชนิดอาจจะแสดงความทนทานต่างกันแม้จะมีหน่วยย่อยเหมือนกัน นักวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์พยายามพัฒนาวิธีการเพื่ออธิบายทั้งธรรมชาติของหน่วยย่อยและการจัดเรียงตัว พอลิเมอร์ที่พบไม่ว่าจากในธรรมชาติ และที่สังเคราะห์ขึ้น มีโครงสร้างได้หลายรูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นกับการเข้าเกาะของมอนอเมอร์ จึงทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างอยู่ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ

ก. พอลิเมอร์แบบเส้น (Linear Polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ สร้างพันธะโคเวเลนต์ยึดกันเป็นสายโซ่ยาว ประกอบด้วยมอนอเมอร์เฉลี่ย 50 หน่วยถึง 500 หน่วย เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต พอลิเมอร์แบบเส้นจะพบโซ่ พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ จึงมีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็ง ชุ่มเหนียวกว่าโครงสร้างอื่นๆ ตัวอย่าง เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ ,พอลิโพรพิลีน, พอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ดังแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 โครงสร้างแบบเส้น [4]

ข. พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้นและโซ่ยาว กิ่งที่แตกออกจากพอลิเมอร์ของโซ่หลักทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มาก พอลิเมอร์แบบกิ่งจึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำยืดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกล่าวคือ เมื่อร้อนจะอ่อนตัวและเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว ตัวอย่าง เช่น พอลิเอทิลีน ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบกิ่ง [4]

ค. พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross Linked Polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแห พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรงและเปราะหักง่าย ดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบร่างแห [4]

2.1.2 พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [4]

ก. เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด ได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลวหรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ตัวอย่าง พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ ชนิดของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมพลาสติก ได้แก่

- โพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แต่อากาศผ่านเข้าออกได้ มีลักษณะขุ่นและทนความร้อนได้พอควร เป็นพลาสติกที่นำมาใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ ถัง ถุง ขวด แทนรองรับสินค้า

- โพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แข็งกว่าโพลีเอทิลีนทนต่อสารไขมันและความร้อนสูง ใช้ทำแผ่นพลาสติก ถุงพลาสติกบรรจุอาหารที่ทนร้อน หลอดดูดพลาสติก เป็นต้น

- โพลิสไตรีน (Polystyrene: PS) มีลักษณะโปร่งใส เปราะ ทนต่อกรดและด่าง ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร ใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น

- SAN (Styrene-Acrylonitrile) เป็นพลาสติกโปร่งใส ใช้ผลิตชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น

- ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) สมบัติคล้ายโพลิสไตรีน แต่ทนสารเคมีดีกว่า เหนียวกว่า โปร่งแสง ใช้ผลิตถ้วย ถาด เป็นต้น

- โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride: PVC) ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร แต่ป้องกันไขมันได้ดี มีลักษณะใส ใช้ทำขวดบรรจุน้ำมันและไขมันปรุงอาหารขวดบรรจุเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ เบียร์ ใช้ทำแผ่นพลาสติก ห่อเนยแข็ง ทำแผ่นแลมินเนตชั้นในของถุงพลาสติก ไนลอน (Nylon) เป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก คงทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ทำแผ่นแลมินเนตสำหรับทำถุงพลาสติกบรรจุอาหารแบบสุญญากาศ

- โพลีเอทิลีน เทอร์เฟธาเลต (Terylene: Polyethylene Terephthalate) เหนียวมากโปร่งใส ราคาแพง ใช้ทำแผ่นฟิล์มบาง ๆ บรรจุอาหาร

- โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate: PC) มีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรงยึดและแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรด แต่ไม่ทนด่าง เป็นรอยหรือคราบอาหาร จับยาก ใช้ทำถ้วย จาน ชาม ขวดนมเด็ก และขวดบรรจุอาหารเด็ก

ข. เทอร์โมเซตติงพลาสติก

เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก คงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ พลาสติกประเภทนี้โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวได้ กล่าวคือ เกิดการเชื่อมต่อกันไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของโพลิเมอร์ (Cross Linking Among Polymer Chains) เหตุนี้หลังจาก พลาสติกเย็นจนแข็งตัวแล้ว จะไม่สามารถทำให้อ่อนได้อีกโดยใช้ความร้อน หากแต่จะสลายตัวทันทีที่อุณหภูมิสูงถึงระดับ การทำพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่าง ๆ ต้องใช้ความร้อนสูง และโดยมากต้องการแรงอัดด้วย เทอร์โมเซตติงพลาสติก ได้แก่

- เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) มีสมบัติทางเคมีทนแรงดันได้ 7,000-135,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงอัดได้ 25,000-50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงกระแทกได้ 0.25-0.35 นิวตันเมตร ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทนความร้อนได้ถึง 140 องศาเซลเซียส และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนยาก เมลามีนใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารหลายชนิด และนิยมใช้กันมาก มีทั้งที่เป็นสีเรียบและสวดลายสวยงาม ข้อเสียคือ น้ำส้มสายชูจะซึมเข้าเนื้อพลาสติกได้ง่าย ทำให้เกิดรอยด่าง แต่ไม่มีพิษภัยเพราะไม่มีปฏิกิริยากับพลาสติก

- ฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์ (Phenol-Formaldehyde) มีความต้านทานต่อตัวทำละลายสารละลายเกลือและน้ำมัน แต่พลาสติกอาจพองบวมได้เนื่องจากน้ำหรือแอลกอฮอล์พลาสติกชนิดนี้ใช้ทำฝาขวดและหม้อ

- อีพ็อกซี (Epoxy) ใช้เคลือบผิวของอุปกรณ์ภายในบ้านเรือน และท่อเก็บก๊าซ ใช้ในการเชื่อมส่วนประกอบโลหะ แก้ว และเซรามิก ใช้ในการหล่ออุปกรณ์ที่ทำจากโลหะและเคลือบผิวอุปกรณ์ ใช้ใส่ในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เส้นใยของท่อ และท่อความดัน ใช้เคลือบผิวของพื้นและผนัง ใช้เป็นวัสดุของแผ่นกำบังนิวตรอน ซีเมนต์ และปูนขาว ใช้เคลือบผิวถนน เพื่อกันลื่น ใช้ทำโฟมแข็ง ใช้เป็นสารในการทำสีของแก้ว

- โพลีเอสเตอร์ (Polyester) กลุ่มของโพลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ (-O•CO-) ในหน่วยซ้ำเป็นโพลิเมอร์ที่นำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ทำพลาสติกสำหรับเคลือบผิว ขวดน้ำ เส้นใยฟิล์มและยาง เป็นต้น ตัวอย่างโพลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต โพลีบิวทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลิเมอร์ผลึกเหลวบางชนิด

- ยูรีเทน (Urethane) ชื่อเรียกทั่วไปของเอทิลคาร์บาเมต มีสูตรทางเคมีคือ $\text{NH}_2\text{COOC}_2\text{H}_5$

- โพลียูรีเทน (Polyurethane) โพลีเมอร์ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน (-NH•CO•O-) เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานต (Di-isocyanates) กับ ไดออล (Diols) หรือไตรออล (Triols) ที่เหมาะสม ใช้เป็นกาว และน้ำมันชักเงา พลาสติกและยาง ชื่อย่อคือ PU

2.1.3 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) [4]

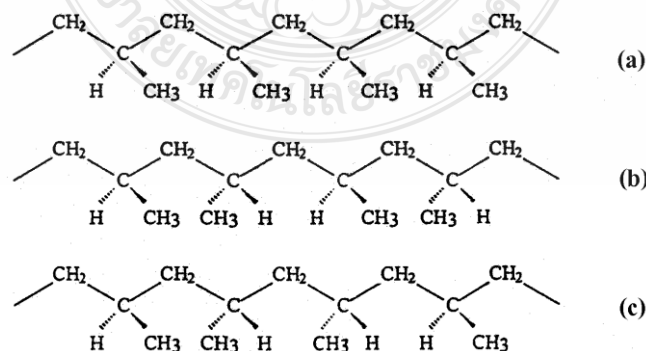
พอลิพรอพิลีน (PP) สามารถเตรียมได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพรอพิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-นัตตา (Ziegler-Natta Catalysts) สามารถผลิตพอลิพรอพิลีนที่มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้

ก. โครงสร้างและสมบัติของพอลิพรอพิลีน

โครงสร้างของพอลิพรอพิลีนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันตามกระบวนการผลิต แบ่งได้เป็น Isotactic, Syndiotactic และ Atactic Polypropylene มีการจัดเรียงตัวดังรูปที่ 2.4 สมบัติของพอลิพรอพิลีนขึ้นอยู่กับความหนาแน่น น้ำหนักโมเลกุล และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล

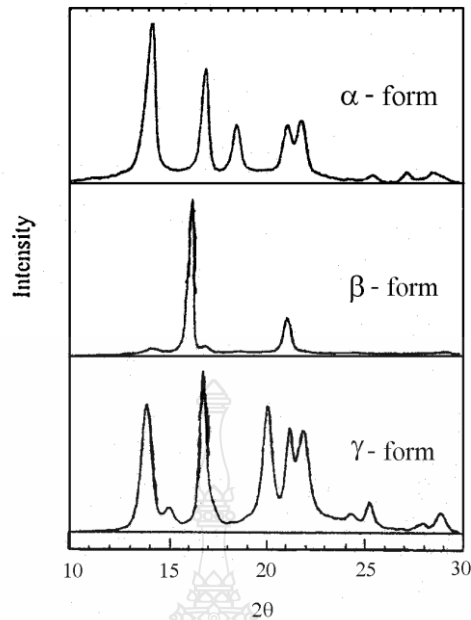
นอกจากการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างแล้วพอลิพรอพิลีนยังมี โครงสร้างผลึกแบ่งเป็น โครงสร้างแบบ α (α -form) มีโครงสร้างผลึกแบบ Monoclinic โครงสร้างแบบ β (β -form) มีโครงสร้างผลึกเป็น Hexagonal และ โครงสร้างแบบ γ (γ -form) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Triclinic ซึ่งโครงสร้างแต่ละแบบจะมี Diffraction Pattern ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.5 [7] โดยทั่วไปพอลิพรอพิลีนจะมีรูปแบบโครงสร้างเป็น α -form และแสดง diffraction peak ที่มุม 2θ ที่ 14.2 , 17.0 และ 18.8° ในระนาบ (110), (040) และ (130) ตามลำดับ

สารตัวเติมที่ผสมลงใน PP เช่น สีย้อม แคลเซียมคาร์บอเนต และ Wollastonite ส่งผลให้ PP มีโครงสร้างแบบ β -form ซึ่งโครงสร้างแบบ β -form สามารถเกิดได้ดีในกรณีที่ใช้สารก่อผลึกแบบ β เช่น Pimelic Acid และ Calcium Stearate [8] โครงสร้างแบบ β -form แสดง Diffraction Peak ที่มุม 2θ ที่ 16.2° ในระนาบ (300) โดยที่โครงสร้างแบบ β -form จะมีการยึดตัวที่จุดขาดและการทนต่อแรงกระแทกสูง แต่จะมีความแข็งแรงดึงและโมดูลัสที่ต่ำกว่าโครงสร้างแบบ α -form ส่วนโครงสร้างแบบ γ -form จะเกิดในสภาวะของการเกิดผลึกภายใต้ความดันสูง (200 MPa)



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างของพอลิพรอพิลีน

(a) Isotactic (b) Syndiotactic และ (c) Atactic [4]



รูปที่ 2.5 WAXD pattern ของ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของ Isotactic Polypropylene [4]

ข. สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

พอลิพรอพิลีนที่ใช้งานมากจะเป็นแบบที่มีการจัดเรียงตัวแบบ Isotactic จะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา มีความเป็นผลึกสูง เป็นพอลิเมอร์ที่จัดว่าเป็นพลาสติกที่เบาที่สุด มีความหนาแน่น 0.905 g/cm³ จากความเป็นผลึกที่สูงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนดี มีความเหนียว แข็งแกร่ง ความแข็งแรงดึงสูง การที่มีจุดหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีนทำให้พอลิพรอพิลีนสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของพอลิพรอพิลีน

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน [4]

สมบัติ	ปริมาณ
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.90-0.91
อุณหภูมิการหลอมเหลว (°C)	160-180
ดัชนีหักเหของแสง n _D ²⁵	1.49
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	500-900
ความแข็ง (shore D)	70-80
การทนแรงกระแทก (J)	34-46
โมดูลัส (MPa)	1032-1720
ความแข็งแรงดึง (MPa)	29.3-38.6
การทนต่อสารประกอบไฮโดรคาร์บอน	อุณหภูมิต่ำกว่า 80 °C

พอลิพรอพิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและคลอรีนไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C ทนต่อกรดและด่าง มีความเสถียร

ต่อความร้อนและแสงแดดต่ำ พอลิพรอพิลีนนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ อุปกรณ์เครื่องใช้ใน บ้าน ภาชนะและบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ใช้ทำเป็นเส้นใย และงานฟิล์ม เป็นต้น

2.2 สารตัวเติม (Filler) [5]

วัตถุประสงค์ของการใช้สารตัวเติมในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเมอร์ คือ เพื่อลด ต้นทุนของวัตถุดิบ ปรับปรุงกระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผสมกับสารตัวเติม อิทธิพล ของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์แบ่งเป็น

2.2.1 อิทธิพลในการเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Extender Filler) [5]

- ก. ทำให้ความหนาแน่น ความแข็ง และโมดูลัสเพิ่มขึ้น
- ข. มีการหดตัว (Shrinkage) ลดลง
- ค. ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแคบลง
- ง. ช่วยปรับปรุงลักษณะของพื้นผิว
- จ. ลดต้นทุน

2.2.2 อิทธิพลในการเป็นสารเสริมแรง (Reinforcing Filler) [5]

- ก. ส่งผลให้ความแข็งแรง ความแข็งแรงดึง และโมดูลัสเพิ่มขึ้น
- ข. ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแคบลง
- ค. ปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกดีขึ้น
- ง. สารตัวเติมที่นำมาใช้มีหลายประเภทจะมีขนาด รูปร่าง และการยึดเกาะกับพอลิ เมอร์แตกต่างกัน เนื่องจากในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้จากซี ตะกรันของอลูมิเนียม

ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์ [5]

สารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic filler)	สารตัวเติมอินทรีย์ (Organic filler)
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)	ผงไม้ (Wood flour)
ไมกา (Mica)	เยื่อไม้ (Wood pulp)
ทัลค์ (Talc)	แป้ง (Starch)
เคอลิน (kaolin)	
วอลลาสโทไนต์ (Wollastonite)	
ใยหิน (Asbestos)	
ซิลิกา (Silica)	
Glass spheres	
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide)	
หรืออะลูมินาไตรไฮเดรต (Alumina Trihydrate)	
ผงโลหะ เช่น Al, Zn, Cu, Ni, etc	
คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black)	
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide)	

2.2.3 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [6]

ในการหลอมอลูมินัมจะมีออกไซด์เกิดขึ้น ถ้ามีน้ำหนักเบาจะลอยขึ้นไปอยู่เหนือผิวโลหะเหลวเรียกว่าขี้ตะกรันอะลูมิเนียม กาก หรือ Dross ถ้ามีน้ำหนักรวมจะจมอยู่ใต้โลหะเหลว เรียกว่า ขี้ไล่ (Sludge)

อะลูมิเนียมออกไซด์ที่บริสุทธิ์ เป็นผลึกสีขาว 1 โมเลกุลประกอบขึ้นด้วย Al 2 อะตอม และ O 3 อะตอมเขียนเป็นสูตรโมเลกุลได้ว่า Al_2O_3 มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่าอลูมินา (Alumina) ชนิดที่บริสุทธิ์เกือบ 100 % และเกิดในธรรมชาติเรียกว่า Corundum ทั้ง Alumina และ Corundum เป็นสารที่แข็งแกร่งแต่ไม่แข็งเท่า Corborundum หรือเพชร แต่ราคาถูกกว่า ทั้งยังใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น Corundum ขึ้นเล็กๆ ใช้ประกอบในเครื่องจักรนาฬิกาและเครื่องมืออื่นๆ Al_2O_3 มีโครงสร้างที่แข็งแรงและต่อกันอย่างซับซ้อน เราจึงไม่สามารถเขียนสูตรโมเลกุลได้ ที่เราเขียน Al_2O_3 นั้นเป็นเพียงสูตร Empirical เท่านั้น Al_2O_3 ที่เกิดในธรรมชาติจะเกิดอยู่ในแร่ Corundum ซึ่งเป็นผลึกที่ใส ไม่มีสี แต่ที่เกิดเป็นพลอยสีต่างๆ ก็เนื่องมาจากมีออกไซด์ของโลหะที่มีสีอยู่ด้วย

อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดคือ Bauxite ซึ่งครั้งแรก Purified มาจากซิลิกอนและอะตอมของธาตุเจือปนอื่นๆ ได้ออกมาเป็นผงสีขาว เรียกว่าอลูมินา ละลายได้ในแร่หลอมเหลว เรียกว่า Cryolite 1 โมเลกุลประกอบขึ้นด้วย Al, F และธาตุอื่นๆ สารนี้เป็นสารสำคัญทำให้ Hall และ Herout พบวิธีแยก Al ได้ อย่างสะดวกสบาย เพราะที่แร่ที่มีอลูมินาอยู่ด้วยเมื่อให้ความร้อนสูงๆ จะกลายเป็นของเหลว ซึ่งทั้งคู่เก็บของเหลวที่ได้นี้ไว้บนเบ้าถ่านแล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านลงไป ในของเหลว โมเลกุล อะลูมิเนียมออกไซด์จะถูกทำให้แยกออกจากกัน อะตอมของ Al จะตกเป็นตะกอนอยู่ก้นภาชนะ คือเบ้าถ่าน ในลักษณะโลหะหลอมเหลว ในเวลาต่อมาหลังจากการค้นพบ ราคาที่ลดน้อยลงเพียงปอนด์ละ 30% หรือถูกกว่านั้น ดังนั้น Al จึงกลายเป็นโลหะที่มีความสำคัญ ใช้กันแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน ถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมจะเป็นโลหะที่มีมากที่สุด และความเป็นจริงเป็นธาตุที่มีมากเป็นที่สามของธาตุทั้งหมด แต่มีความสำคัญเป็นที่สองรองจากเหล็ก ส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะเป็นโลหะที่เตรียมยาก ส่วนมากอยู่ในรูปอะลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น เฟลสปาร์ แต่จากแร่นี้ก็ได้นำมาเตรียมอะลูมิเนียมที่บริสุทธิ์โดยประหยัดค่าใช้จ่ายไม่ได้ ในธรรมชาติมีออกไซด์ของอะลูมิเนียมอยู่นั่นก็คือ แร่บอกไซด์ (Bauxite) ซึ่งใช้เตรียมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ได้ด้วยวิธีทางไฟฟ้าแต่ต้องกำจัดเหล็กและซิลิกอนออกจากสินแร่ก่อน การทำบอกไซด์ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีของแบร์ (Bayer Process) ที่อาศัยสมบัติของอะลูมิเนียมอัมโฟเตอร์ิก โดยนำออกไซด์ที่ไม่บริสุทธิ์มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH ที่ร้อน จะเกิดออลูมินาไฮดรอกไซด์ที่ละลายด้วย แต่เฟริกออกไซด์ไม่ละลาย เนื่องจากไม่มีสมบัติอัมโฟเตอร์ิก นำสารละลายที่ได้มากรองแล้วแยกเอาเฟริกออกไซด์ออก ทำสารละลายให้เย็นกวนกับอากาศ แล้วเติมผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นหัวเชื้อจะทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ตกตะกอน ส่วนซิลิเกตยังคงอยู่ในสารละลาย ออลูมินาไฮดรอกไซด์จะตกผลึกจากสารละลายที่มีซัลเฟตและแคตไอออนที่มีประจุบวกในน้ำให้สารประกอบที่เรียกว่า Alum ซึ่งเป็นเกลือของสารชนิด Double Salt มีสูตรทั่วไป $MM'(SO_4)_{2.12} H_2O$ ในเมื่อเป็นแคตไอออนที่มีประจุ+1 เช่น K^+ , Na^+ หรือ NH_4^+ และ M เป็นแคตไอออนที่มีประจุ+3 เช่น Al^{+3} , Fe^{+3} หรือ Cr^{+3} เมื่อเอาอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงจะคายน้ำออกและกลายเป็น Al_2O_3 ซึ่งบางที่เรียกอะลูมินา สารนี้เนื้อเยียวมาก มีจุดหลอมเหลวสูง(ประมาณ 2000 องศาเซลเซียส) ใช้เป็นประโยชน์เป็นสารที่ทนความร้อนสูง ในการทำภาชนะที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ตามปกติอะลูมินามีสีขาว แต่จะมีสีเมื่อเติมออกไซด์บางตัว เช่น Cr_2O_3 Fe_3O_4

อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารประกอบแน่นทึบที่มีสภาวะคงที่มาก มีจุดหลอมเหลว 2050°C มีน้ำหนักจำเพาะ 3.9 มากกว่าโลหะเหลว 2.7 แต่มันจะไม่แยกตัวออกจากโลหะเหลวได้ง่าย เนื่องจากมีแรงตึงผิวสูงต่อโลหะเหลว

อะลูมิเนียมจะเกิดออกไซด์ได้ง่าย หากสัมผัสกับความชื้น ดังสมการที่ 2.1



โดยสาเหตุของการเกิดออกไซด์สูง คือ

- จากโลหะที่มีออกไซด์อยู่แล้ว
- เกิดจากการสั่นสะเทือน หรือการก่อวนโลหะเหลวขณะหลอม
- เกิดการอลวน (Turbulent) ขณะขนถ่าย และ เทหล่อ
- เศษโลหะมีธาตุ Mg เจืออยู่ในปริมาณมาก
- บรรยากาศของเตาหลอมมีความชื้นสูง
- หลอมที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป

การกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ส่วนมากจะใช้ ฟลูออไรด์ หรือ คลอไรด์ ซึ่งเกิด Electrolytic กับอลูมิเนียมได้ดี เชื้อหลอมจะห่อหุ้มอนุภาค Al_2O_3 แยกออกจากโลหะเหลวและหลังจากนั้นจะใช้วิธีทางกลโดยการสั่นสะเทือน โดยการควบคุมที่เตาหลอม หรือทำให้เกิดการกวน หมุนวน เพื่อให้ Al_2O_3 ลอยขึ้นไปรวมกับขี้ตะกรัน กลายเป็นกากต่อไป ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์ ฉะนั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในงานวิจัยนี้จะมีฟลักซ์ (ฟลูออไรด์, คลอไรด์) ผสมปะปนมาด้วย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์ [6]

สมบัติ	ปริมาณ
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้ R.T)	2.70 ก./ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่ M.P.	2.375 ก./ซม. ³
จุดหลอมเหลว	933.47 K(660.32°C)
จุดเดือด	2792 K(2519°C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	10.71 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	294.0 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25°C) 24.200 J/(Mol·K)

2.3 การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม [7]

การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมอาจเรียกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composite) วัตถุประสงค์ของการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม คือ ช่วยในการขึ้นรูป ปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่นโมดูลัส ช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบ และปรับปรุงการพิมพ์สีในงานฟิล์ม

ความแตกต่างระหว่างผิวของพอลิเมอร์กับสารตัวเติม คือการที่พอลิเมอร์เช่นพอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีนไม่มีขั้วจึงไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ที่แข็งแรง ทำให้การยึดตัวที่จุดขาด ความเหนียว และการรับแรงกระแทกจะลดลง ขณะที่สารตัวเติมส่งผลให้พอลิเมอร์มีโมดูลัสที่สูงขึ้นเนื่องจากความแข็งของสารตัวเติม ปัจจัยของสารตัวเติมที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ ได้แก่ ขนาดการกระจายตัวของสารตัวเติมในโครงสร้างของพอลิเมอร์ (Polymer Matrix) และการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมกับ Polymer Matrix โดยขนาดอนุภาคที่เล็ก และมีการกระจายตัวดีจะให้สมบัติของพอลิเมอร์ที่ดีด้วย จากการศึกษาของ Murthy และคณะ ในการผสมระหว่าง Talc กับพอลิเอทิลีนและไนลอน พบว่าขนาดของอนุภาคที่เล็กจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น และสมบัติในการซึมผ่านดีกว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ แต่ในการผสมระหว่าง CaCO_3 กับ PVC พบว่าสมบัติเชิงกลที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค แต่มีผลจากการปรับปรุงผิวของ CaCO_3 ที่ส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น สำหรับสารตัวเติมที่มีขนาดเล็ก เมื่อผสมลงในพอลิเมอร์จะเกิดปัญหาในเรื่องของการกระจายตัว โดยจะมีการรวมตัว (Agglomerate) ของอนุภาคสารตัวเติมเกิดขึ้น ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถปรับปรุงได้ โดยการปรับปรุงผิวของสารตัวเติมโดยใช้สารเคมี ได้แก่ Coupling หรือ Wetting Agent ซึ่งสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงผิว จะทำให้สารตัวเติมมีการกระจายตัวดีในพอลิเมอร์ โดยสารเคมีประเภท Coupling Agent จะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมดีขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อสารตัวเติมสามารถกระจายตัวได้ดีก็จะส่งผลให้สามารถเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในการผสมได้

2.4 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อกระบวนการผลิต [7]

2.4.1 ลักษณะของการผสม [7]

ลักษณะของการผสมสามารถแบ่งการผสมได้เป็น

ก. Extensive หรือ Distributive Mixing (Blending) เป็นการผสมโดยนำส่วนผสมต่าง ๆ มาคลุกเคล้ากัน เช่นการนำเม็ดพลาสติก ผงสี และสารเติมแต่ง มาผสมกัน เพื่อให้มีความสม่ำเสมอของส่วนผสมที่ส่งต่อไป

ข. Intensive หรือ Dispersive Mixing เป็นการผสมที่ทำให้สารเติมแต่งต่าง ๆ มีการกระจายทั่วทั้งโครงสร้าง (Matrix) ของพอลิเมอร์ การผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ มีการเกิดแรงเฉือน และการหลอมตัวของพอลิเมอร์ ภายหลังจากการผสม ส่วนผสมจะถูกตัดเป็นเม็ด โดยที่แต่ละส่วนผสมจะกระจายตัวเท่า ๆ ภายในการผสม สำหรับการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมจะขึ้นอยู่กับความหนืดของระบบการผสม การผสมในระบบที่ 1 จะมีความสม่ำเสมอของส่วนผสม แต่การกระจายตัวของสารตัวเติมไม่ดี และมีความหนืดของการผสมต่ำกว่าระบบที่ 2

2.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม [7]

เครื่องมือที่ใช้ในการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมแบ่งได้เป็น

ก. Two-Roll Mill เป็นการผสมแบบระบบเปิดที่ให้การกระจายตัว (Dispersive) ของสารตัวเติมดี สำหรับการผสมที่ต้องการความสม่ำเสมอของส่วนผสม (Distributive Mixing) จะขึ้นอยู่กับ การตัด และพับของผสม เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง หรือการเตรียม Masterbatch ระหว่างพลาสติกกับสารเติมแต่งต่าง ๆ

ข. Internal Mixer เป็นการผสมแบบระบบปิดที่เตรียมเป็นครั้ง (Batch Mixer) เป็นเครื่องมือที่ให้การผสมที่มีการกระจายตัว และความสม่ำเสมอของส่วนผสมที่ดี ซึ่งหลังจากการเตรียมส่วนผสมเสร็จแล้ว จะต้องใช้เครื่องมืออื่นช่วยในการตัดเป็นเม็ดเพื่อนำไปขึ้นรูปต่อไป

ค. Single Screw Extruder เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการผสมแบบต่อเนื่อง และมีราคาไม่แพง แต่จะให้การผสมระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ไม่ดี เนื่องจากมี Residence Time Distribution กว้าง ซึ่งการผสมจะดีขึ้นเมื่อปรับปรุงเครื่องมือ หรือการใช้สกรูที่มีลักษณะเฉพาะ

ง. Twin Screw Extruder เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม ซึ่งเครื่องมือสามารถแบ่งได้เป็น Co-Rotating Twin Screw Extruder และ Counter-Rotating Twin Screw Extruder โดยมีลักษณะเป็น Intermeshing และ Nonintermeshing ซึ่ง Nonintermeshing Twin Screw Extruder จะมีลักษณะคล้ายเป็น Single Screw ที่จะทำให้ความสม่ำเสมอของส่วนผสม สำหรับ Intermeshing Twin Screw Extruder จะให้การผสมที่มีการกระจายตัวดีของสารตัวเติม และเครื่องมือที่ผสมแบ่งเป็น

- Intermeshing Co-Rotating Twin Screw Extruder เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม หรือพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งต่าง ๆ ซึ่งข้อดีของเครื่องมือชนิดนี้ คือ ให้การผสมที่มีความสม่ำเสมอของส่วนผสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของส่วนผสมต่าง ๆ โดยให้การกระจายตัวของสารตัวเติมดี และมีความแน่นอนในการควบคุมการผสม

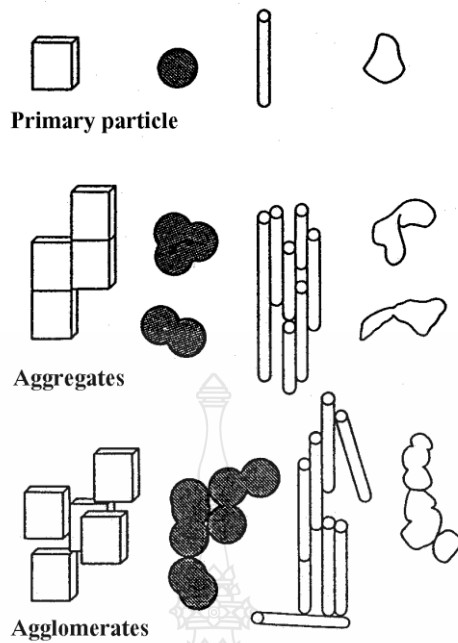
- Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruder เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม การกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติมจะได้จากแรงเฉือนที่เกิดจากเครื่องสูง โดยการใช้ความเร็วรอบสูงในการผสม และเป็นเครื่องมือที่ให้ความสม่ำเสมอของส่วนผสม

2.4.3 การรวมตัวของสารตัวเติม [7]

ลักษณะของอนุภาค และการรวมตัวของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 2.10 รูปร่างของสารตัวเติมจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ซึ่งการอยู่ร่วมกันของอนุภาคแบ่งเป็น อนุภาคเดี่ยว (Primary Particle) หรือมีการรวมตัวของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อน (Aggregates หรือ Agglomerates) การรวมตัวแบบ aggregate จะเป็นการที่แต่ละอนุภาคมารวมตัวกัน โดยไม่สามารถทำให้เกิดการแยกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวได้ พื้นที่ผิว (Surface Area) ของอนุภาคแบบ Aggregate จะมีค่าน้อยกว่า Surface Area ของแต่ละอนุภาครวมกัน สำหรับการรวมตัวของอนุภาคแบบ Agglomerate สามารถทำให้แต่ละอนุภาคที่มารวมตัวกันแยกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวได้ โดยที่ Surface Area จะเท่ากับ Surface area ของแต่ละอนุภาคที่มารวมกัน

2.4.4 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อความหนืด [7]

ผลของสารตัวเติมต่อความหนืด แบ่งได้เป็นอิทธิพลจากขนาดอนุภาค ปริมาณ Surface Area และ Aspect Ratio โดยมีรูปร่างดังรูปที่ 2.6 โดยที่อนุภาคขนาดเล็กจะมี Surface Area สูง จะยากต่อการกระจายตัวเมื่อผสมกับพอลิเมอร์ ทำให้ความหนืดของการผสมสูงขึ้น ทำปริมาณการผสมของสารตัวเติมขนาดเล็กในพอลิเมอร์ต่ำ สารตัวเติมที่มี Aspect Ratio คืออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคที่สูง จะทำให้ความหนืดของการผสมสูงด้วย เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของขนาดของอนุภาค พบว่าเมื่ออนุภาคมีการกระจายตัวที่กว้างจะมีความหนืดของการผสมที่ต่ำกว่าอนุภาคที่มีการกระจายตัวที่แคบ



รูปที่ 2.6 ลักษณะของอนุภาคและการรวมตัวของอนุภาค [7]

2.5 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ [8]

2.2.1 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ [8]

การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบภายในโครงสร้าง ทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเกิดขึ้น ความสามารถในการเกิดผลึกขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในสายโซ่ และแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของพอลิเมอร์ รวมไปถึงสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้ในการผสม

ก. จลนศาสตร์ของการเกิดผลึก

เมื่อพอลิเมอร์ในสภาวะหลอมเหลวถูกทำให้เย็นตัว จะมีผลึกเกิดขึ้น ซึ่งการเกิดผลึกจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดผลึก และเวลา โดยที่อัตราการเกิดผลึกสามารถวัดได้จากเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน, การวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามอุณหภูมิ (Dilatometry), Infrared Spectroscopy และ Optical Microscope เป็นต้น ในการเกิดผลึกส่วนที่เป็นผลึกที่เกิดขึ้นต่อเวลาสามารถศึกษาได้จากสมการของ Avrami หาได้จากสมการที่ 2.2

$$\phi = 1 - \exp(-kt^n) \quad (2.2)$$

โดยที่ ϕ คือ ส่วนที่เป็นผลึกที่เกิดขึ้น (Fractional crystallinity)
 k คือ อัตราการเกิดผลึก (Crystallization rate)
 t คือ เวลา (Time)
 n คือ ค่าคงที่ของการเกิดนิวเคลียส (Nucleation index)

โดยที่ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์สามารถหาได้จากเทคนิค X-ray Diffraction, การวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Heat of Fusion) จากเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และการวัดความหนาแน่น

การเกิดผลึกจะขึ้นอยู่กับสถานะของการเกิดผลึก และความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ ซึ่งจะทำให้มีลักษณะรูปแบบของผลึกที่แตกต่างกันไป เช่น Spherulite, Axialites, Shish Kebab หรือ Fibril โดยลักษณะที่พบมากที่สุด คือ Spherulite โดยที่การเกิดผลึก (Spherulite) ซึ่งการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเกิดนิวเคลียส และกระบวนการโตของผลึก

ข. กระบวนการเกิดนิวเคลียส

ผลึกที่เกิดจากการหลอมเหลวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน (Crystallization from Melt) หรือการละลายในสารละลาย (Crystallization from Solution) เมื่อทำให้เย็นตัว สายโซ่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่พันกันจะเริ่มวางตัวเป็นระเบียบ และเริ่มเกิดนิวเคลียส หรือขั้นตอนที่เรียกว่ากระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) โดยที่อัตราการเกิดผลึกจะเป็นไปตามสมการที่ 2.3

$$N = N_0 \exp \left\{ \left(-\frac{E_D}{RT} \right) - \left(\frac{\Delta G}{RT} \right) \right\} \quad (2.3)$$

- โดยที่ N คือ อัตราการเกิดผลึก
 N_0 คือ ค่าคงที่ของการเกิดผลึก
 E_D คือ พลังงานกระตุ้น
 ΔG คือ พลังงานอิสระที่ใช้ในการเกิดนิวเคลียสที่มีขนาดเหมาะสม
 R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ
 T คือ อุณหภูมิ (K)

จากสมการจะพบว่าอัตราการเกิดนิวเคลียสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยที่อัตราการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง กระบวนการเกิดผลึกแบ่งได้เป็น กระบวนการเกิดผลึกได้เอง (Homogeneous Nucleation) และกระบวนการเกิดผลึกที่อาศัยอนุภาคอื่นช่วยในการเกิดผลึก (Heterogeneous Nucleation)

ค. กระบวนการโตของผลึก

การโตของผลึกจะมีลักษณะเป็น 1 หรือ 2 มิติ ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม หรือมีลักษณะเป็นแท่ง อัตราการโตของผลึก (G) สามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึกตามเวลา (t) ที่อุณหภูมิของการเกิดผลึกดังสมการที่ 2.4

$$G = \frac{dr}{dt} \quad (2.4)$$

โดยที่ r คือ รัศมีของผลึก (spherulite radius)

$$G = G_0 \exp \left\{ \left(-\frac{E_D}{RT} \right) - \left(\frac{\Delta G}{RT} \right) \right\} \quad (2.5)$$

ซึ่งอัตราการโตของผลึก (G) จะเป็นไปตามสมการที่ 2.5 ซึ่งคล้ายกับสมการที่ 2.4 โดยที่อัตราการโตของผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเช่นเดียวกับอัตราการเกิดนิวเคลียส

ในการเกิดผลึก อัตราการเกิดผลึกสามารถวัดได้จากปริมาณการเกิดนิวเคลียส และอัตราการโตของนิวเคลียส และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเกิดผลึก โดยทั่วไปอุณหภูมิในการเกิดผลึกสูงสุดจะเป็นไปตามสมการที่ 2.6

$$T_1 = 0.8 T_m \quad (2.6)$$

โดยที่ T_1 คือ อุณหภูมิในการเกิดผลึก

T_m คือ อุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (Melting Temperature)

ปริมาณการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มตามความแตกต่างของอุณหภูมิการเกิดผลึกกับอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่เรียกว่า Degree of Undercooling หรือ Supercooling การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลึกขนาดเล็ก เนื่องจากมีอัตราการเกิดนิวเคลียสสูง และอัตราการโตต่ำ ขณะที่การเกิดผลึกที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลึกขนาดใหญ่ ขนาดของผลึกจะมีผลต่อความแข็งแรง และลักษณะความเสียหายของพอลิเมอร์ สำหรับผลึกขนาดเล็กซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ หรือจากการเติมสารก่อนิวเคลียส (Nucleating Agent) จะช่วยเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น (Ductility) ความแข็งแรงดึง (Yield Strength) และสมบัติการรับแรงกระแทก (Impact Strength) ให้กับพอลิเมอร์

2.5.2 ผลของสารตัวเติมต่อการเกิดผลึก [8]

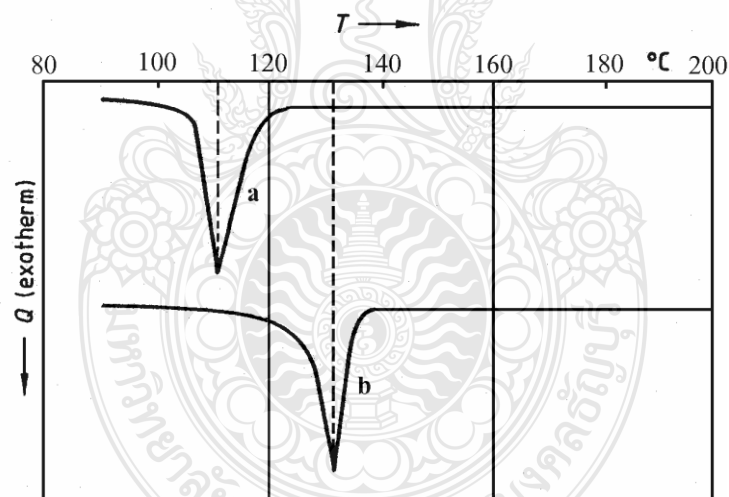
สารตัวเติมโดยทั่วไปจะมีพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface Free Energy) ที่สูง เมื่อผสมกับพอลิเมอร์ ที่ผิวของสารตัวเติมจะเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์สามารถเกิดผลึกได้ง่าย หรือเรียกได้ว่าผิวของสารตัวเติมมีลักษณะเป็น Nucleating Activity ในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เกิดผลึก จะได้ผลึกขนาดเล็ก ทำให้ความเป็นผลึกสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรง โมดูลัส ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยที่การยืดตัว และสมบัติการรับแรงกระแทกลดลง และมีผลต่อเวลาในการขึ้นรูปของกระบวนการแบบฉีด โดยที่สารตัวเติมส่งผลให้กระบวนการฉีดขึ้นรูปมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้น ทำให้เวลาในการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดลดลง การศึกษาผลของการเป็นสารก่อผลึก (Nucleating Agent) สามารถศึกษาได้จาก

ก. เทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Thermal Analysis, DTA หรือ Differential Scanning Calorimetry, DSC) เทคนิค DTA และ DSC ใช้ในการศึกษาการเกิดผลึกของพอลิเมอร์จากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน และสามารถใช้ในการศึกษาผลของการเป็นสารก่อผลึก โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) โดยที่ T_c จะเพิ่มตาม Nuclear density และแสดงผลของการเป็นสารก่อผลึก จากรูปที่ 2.7 เป็นกราฟของเกิดผลึกจากเทคนิค DSC ของพอลิโพรพิลีนไม่เติมสารก่อผลึก และเติม 1% Sodium p-tert.-Butylbenzoate ที่อัตราการเย็นตัว 8 K/min การเกิดผลึกจากเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเติมสารก่อผลึกลงไปจะส่งผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดผลึกของ PP เพิ่มขึ้น

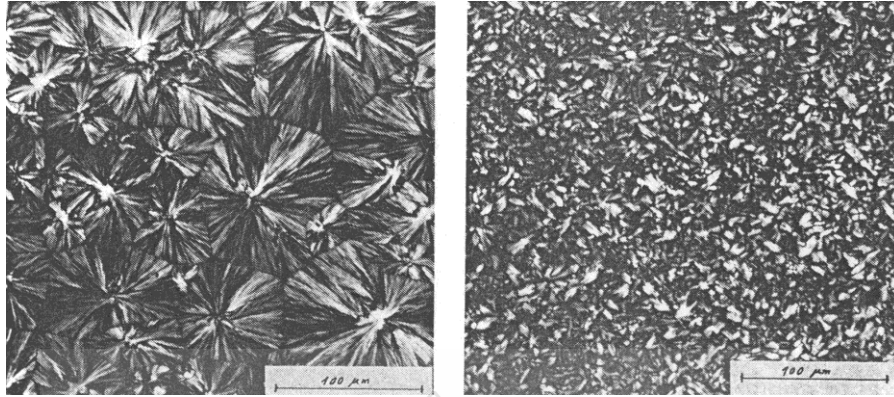
ข. การศึกษาขนาดของผลึกจากเทคนิค Polarized Optical Microscope จะเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น และศึกษาอัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ได้ ผลึกที่ได้จากการศึกษาโดย Polarized Optical Microscope จะมีลักษณะเป็น Spherulite ที่มีลักษณะของ Maltese Cross Pattern ภายใต้การตัดกันของแสง Polarized (Cross Polar) เมื่อเติมสารก่อผลึกลงไปจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึกเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.8

ในการศึกษาอัตราการเกิดผลึกจะใช้เทคนิค Hot-Stage ร่วมกับ Polarized Optical Microscopy โดยการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์โดยเทคนิค Hot-Stage และศึกษาผลึกที่เกิดขึ้นจากการสังเกตจาก Polarized Optical Microscope ในการศึกษาปริมาณนิวเคลียส และอัตราการโตของผลึกภายใต้สภาวะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Crystallization) ซึ่งจะทำให้การวัดขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น และศึกษาอัตราการเกิดผลึกเทียบกับอุณหภูมิในการเกิดผลึก โดยที่ผลึกสามารถเกิดและเติบโตได้เร็ว จะมีการใช้เทคนิคการบันทึกภาพเพื่อช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.8

ปริมาณนิวเคลียสและขนาดของผลึก จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเป็นสารก่อผลึกของพอลิเมอร์ ในการเป็นสารก่อผลึกปริมาณนิวเคลียสจะมากกว่าการไม่เติมสารก่อผลึก โดยที่การเติมสารก่อผลึกจะทำให้ขนาดของผลึกเปลี่ยนแปลงไป จากการศึกษาของ Rybnikar Talc จะเป็น Nucleation Active Site ทำให้ขนาดของ Spherulite ของ PP เล็กลง โดยทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก และเพิ่มความเป็นผลึกให้กับพอลิเอทิลีนและไนลอน 6



รูปที่ 2.7 แสดงของการเกิดผลึกจากเทคนิค DSC ของพอลิพรอพิลีน (a) ไม่เติมสารก่อผลึก (b) เติม 1% Sodium p-tert.-Butylbenzoate ที่อัตราการเย็นตัว 8 K/min [8]



(1)

(2)

รูปที่ 2.8 อิทธิพลของสารก่อผลึกต่อขนาดของ Spherulite ของพอลิพรอพิลีน (1) Spherulite ของพอลิพรอพิลีน (2) Spherulite ของพอลิพรอพิลีนเมื่อเติมสารก่อผลึก [8]

2.5.3 สมบัติที่ต้องการของสารก่อผลึก [8]

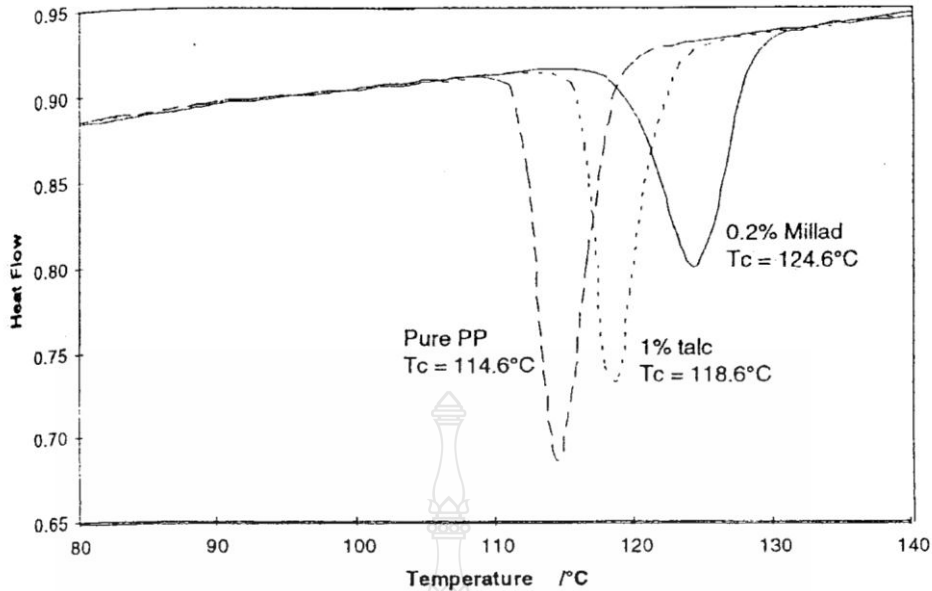
สารก่อผลึกที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

- ถูกทำให้เปียกหรือดูดซับได้โดยพอลิเมอร์
- ไม่ละลายในพอลิเมอร์
- มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าของพอลิเมอร์
- เสถียร ไม่ระเหย และไม่เกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม

ไม่ว่าจะเป็นพอลิเมอร์ออกซิเจน ความชื้น หรือสารเติมแต่งเติมอื่นในกรณีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ผลผลิตที่ได้จะต้องทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ สำหรับสารที่นำมาใช้เป็นสารก่อผลึก อาจเป็นสารอินทรีย์ เช่น ทัลค์ ซิลิกา แคลซิน เป็นต้น สารอินทรีย์ เช่น เกลือของกรดโมโน-หรือพอลิคาร์บอซิลิก ผงสี บางชนิด เป็นต้น พอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิเอไมด์ 6.6 หรือ PET สามารถใช้เป็นสารก่อผลึกสำหรับพอลิเอไมด์ 6 ได้

2.5.4 การตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อผลึก [8]

วิธีการที่นำมาใช้กันมากที่สุดในการศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกของ พอลิเมอร์หลอมเหลวและตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อผลึกคือ การหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อน DSC (Differential Scanning Calorimetry) โดยทำให้ พอลิเมอร์หลอมเหลวแล้วลดความร้อนลงโดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิคงที่จะได้ DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิซึ่งปรากฏที่การคายพลังงานที่แสดงถึงอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์



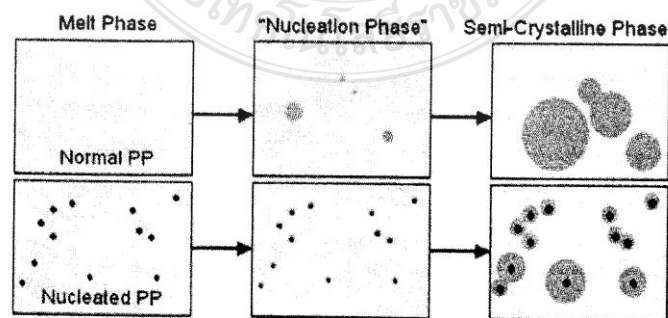
รูปที่ 2.9 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของโพลีโพรพิลีน [8]

รูป 2.9 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของโพลีโพรพิลีนทั้งในกรณีที่ไม่ใส่และใส่สารก่อผลึก (ทัลค์ 1 % และ Millad 0.1 %) ซึ่งจะเห็นได้ว่า T_c ของโพลีโพรพิลีนสูงขึ้นเมื่อใส่สารก่อผลึก (แสดงว่าพอลิเมอร์เกิดผลึกได้เร็วขึ้น) โดยทั่วไปแล้วผลจากการใส่สารก่อผลึกในพอลิเมอร์มีดังนี้

ก. อัตราการเกิดผลึกโดยรวมของพอลิเมอร์สูงขึ้น กล่าวคือ ผลึกเกิดได้เร็วขึ้น (T_c สูงขึ้น) ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแข็งตัวเร็วขึ้น ดังนั้น เวลาโดยรวมที่ใช้ในกระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ (Injection Molding) จึงลดลง ส่งผลให้ศักยภาพในการผลิตสูงขึ้น

ข. ดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้น พอลิเมอร์จะมีความทนแรงดึง โมดูลัสและความแข็งเพิ่มขึ้น

ค. ผลึกสเฟียรูไลต์มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กลง (รูป 2.10) ทำให้แสงสามารถผ่านผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ผลิตภัณฑ์จึงมีความใสมากขึ้น หรือมีความขุ่นลดลง ซึ่งในกรณีที่ใช้สารก่อผลึกทำให้พอลิเมอร์มีความโปร่งใสมาก จะเรียกสารก่อผลึกว่า สารทำให้ใส (Clarifying Agents)



รูปที่ 2.10 ขนาดและการกระจายขนาดของผลึกในโครงสร้างโมเลกุลของโพลีโพรพิลีน แกวบนไม่ได้ใส่สารก่อผลึก แกวล่างใส่สารก่อผลึก [8]

นอกจากนี้ จากการศึกษาที่โครงสร้างผลึกมีความละเอียดและสม่ำเสมอมากขึ้น จึงช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกและการยึด ผน จุดขาดของพอลิเมอร์ด้วย เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวจะช่วยกระจายแรงที่กระทำบนพอลิเมอร์ได้ดี (อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้สารก่อผลึกในบางกรณี อาจทำให้ความทนแรงกระแทกลดลงเล็กน้อย)

2.6 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [8]

2.5.2 ผลของขนาด ปริมาณ และการกระจายตัวของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [8]

ก. โมดูลัส (Modulus) สารตัวเติมจะเพิ่มโมดูลัสให้กับพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติม เนื่องจากความแข็งของสารตัวเติมมากกว่าพอลิเมอร์ ปริมาณของสารตัวเติมมีผลทำให้โมดูลัสเพิ่มขึ้น อนุภาคของสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวของอนุภาคที่แคบ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสลดลง ขณะที่สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่กว้าง จะทำให้โมดูลัสของพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมนั้นเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของการกระจายตัวของอนุภาคจะพบว่าการรวมตัวของอนุภาค (Agglomerate) อาจทำให้ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนที่มีการรวมตัวกัน จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลง Stress และ Strain น้อยกว่า หรือเนื่องจากการมี Interaction ระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ และ Interaction ระหว่างสารตัวเติมเอง ทำให้ค่าโมดูลัสสูงขึ้น

ข. ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ ได้แก่ การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม (Particle packing) ขนาด รูปร่าง การกระจายตัว และการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม สารตัวเติมอาจจะส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น หรือลดลง โดยทั่วไปขนาดอนุภาคที่เล็ก และการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม รวมไปถึงการกระจายตัวและการยึดเกาะที่ดีของสารตัวเติมภายในการผสมกับพอลิเมอร์ จะทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ในกรณีที่การผสมที่มีความสม่ำเสมอระหว่างอนุภาคสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ไม่ดี จะทำให้ความสามารถในการรับแรงและการยึดตัวของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้ขาดง่าย ความแข็งแรงดึงจึงลดลง

ค. การยืดตัว (Elongation) ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การยืดตัวของพอลิเมอร์ลดลง โดยที่สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีการยึดเกาะที่ดีกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ (Polymer Matrix) จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงดึง และทำให้การยืดตัวของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

ง. การรับแรงกระแทก (Impact Strength) สารตัวเติมที่ผสมลงไปในพอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นแหล่งรวมแรง (Stress Concentrator) โดยมีลักษณะการยืดตัว (Ductility) ที่แตกต่างกัน ระหว่าง Polymer Matrix กับสารตัวเติม ดังนั้นสารตัวเติมที่มีความแข็ง ค่าโมดูลัสสูง มีการยืดตัวที่ต่ำ จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ ดังนั้นการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์จึงลดลง ในขณะที่อนุภาคของสารที่นำมาผสม มีความสามารถในการยืดตัวได้สูงกว่า Polymer Matrix เช่นอนุภาคของยาง สามารถปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์นั้นได้ (Impact Modifier) สำหรับสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก และมีการกระจายตัวของอนุภาคที่แคบ จะเกิดการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอ จะช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์

2.6.2 การปรับปรุงผิวของสารตัวเติม [8]

เมื่อทำการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมจะปรากฏลักษณะของการไม่เข้ากัน (Incompatibility) ที่บริเวณผิวสัมผัส (Interface) เนื่องจากพอลิเมอร์และสารตัวเติมจะมีความแตกต่าง

กันในเรื่องเคมีของพื้นผิว (Surface Chemistry) โดยที่สารตัวเติมมีความเป็นขี้ และมี Surface area สูง ทำให้ยากต่อการกระจายตัว และการสัมผัสกับผิว (Wetting) ของพอลิเมอร์ เมื่อสารตัวเติมมีกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความไม่สม่ำเสมอ และการที่สารตัวเติมสัมผัสกับผิวของพอลิเมอร์ไม่ดี จะทำให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ลดลง และดูดความชื้นได้ง่าย รวมทั้งเมื่อใช้สารตัวเติมในปริมาณสูง ทำให้ความหนืดในการผสมสูง และไหลได้ยาก จึงมีการเคลือบผิวสารตัวเติมเพื่อให้การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมมีประสิทธิภาพการผสม และสมบัติของพอลิเมอร์ที่ดี การเคลือบผิวหรือการปรับปรุงผิวโดยการใช้สารเคมีที่เรียกว่า Coupling หรือ Wetting Agent จากการเคลือบผิวสารตัวเติมจะช่วยให้สารตัวเติมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ความหนืดในการผสมลดลง ส่งผลให้เพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ได้ นอกจากนี้สารเคมีประเภท Coupling Agent มีผลให้การยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมดีขึ้น ทำให้การยึดตัว และสมบัติในการรับแรงกระแทกดีขึ้น

ประเภทของสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงผิว

- Silane Coupling Agent
- Titanate Coupling Agent
- Zirconium Coupling Agent
- Reactive Cellulosics
- Hydrophobic Wetting Agent
- Fatty Acid Esters
- Chlorinated Paraffins
- Organosilicons

ซึ่งการเคลือบผิวหรือปรับปรุงผิวของสารตัวเติมสามารถทำได้โดยนำสารเคมีที่ใช้เคลือบผิวผสมกับสารตัวเติม หรือที่เรียกว่าเคลือบผิวสารตัวเติมก่อนนำมาผสมกับพอลิเมอร์ หรือการผสมพอลิเมอร์ สารตัวเติม และสารเคมีที่ใช้ปรับปรุงผิวไปในระหว่างกระบวนการผสมพอลิเมอร์ (In situ) ซึ่งในแบบที่สองสมบัติที่ต้องการอาจจะลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคลือบผิวกับสารตัวเติม และพอลิเมอร์ จะถูกแทนที่โดยการเกิดแรงยึดเหนี่ยว (Interaction) ของพอลิเมอร์ระหว่างผสม

2.7 การบดและการคัดแยกขนาด [9]

2.7.1 การบดหรือการลดขนาดอนุภาค [9]

เป็นการให้แรงในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กลง การให้แรงกับอนุภาคของแข็งแบ่งได้เป็น

- ก. การบดโดยให้แรงกับผิวของอนุภาคของแข็ง (Crushing)
- ข. การให้แรงกระแทกกับอนุภาคของแข็ง (Impact)
- ค. การใช้เครื่องมือในการตัดอนุภาคของแข็ง (Cutting)
- ง. การให้แรงโดยผ่านตัวกลาง (surrounding media) เช่นลูกบด

2.7.2 การเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดขนาด [9]

การเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดขนาดขึ้นอยู่กับลักษณะของอนุภาคได้แก่ ขนาด รูปร่าง ความแข็ง และการทนต่อความร้อน เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้ในการลดขนาดอนุภาคแบ่งได้เป็น

ก. Crusher เป็นเครื่องมือที่ใช้ลดขนาดอนุภาคในงานเหมืองแร่ การทำงานของเครื่องมือจะเป็นการให้แรงบด หรือกระแทกกับอนุภาคของแข็ง ลักษณะของเครื่องมือมีหลายประเภท ได้แก่ Jaw crusher, Gyratory Crusher, Roll Crusher และ Impact Crusher

ข. Grinding Media Mill เครื่องมือที่ใช้ลดขนาดประเภทนี้ ภายในของเครื่องมือจะมีตัวกลางเพื่อช่วยในการลดขนาด เช่น ลูกบอล หรืออนุภาคของแข็งที่นำมาลดขนาด ลักษณะของเครื่องมือ ได้แก่ Tumbling Mills, Vibration Mill, Planetary Mill และ A ball Mill

ค. Roller และ Ring-Roller Mills เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการลดขนาดกับอนุภาคของแข็งที่ใช้ในงานการเกษตร สามารถลดขนาดอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งสูงจนถึงมีความแข็งน้อยได้

ง. Impact และ Jet Mill เครื่องมือประเภทนี้สามารถลดขนาดอนุภาคได้จนถึง 1-10 μm โดยขนาดที่ลดได้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือ และสภาวะของการลดขนาด เช่น อัตราการไหลของอากาศที่ใช้

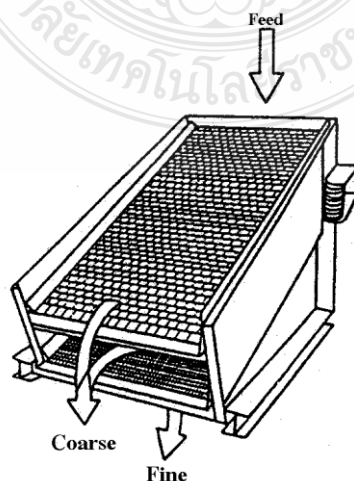
จ. Cutting Mill เป็นเครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทเส้นใย พิล์ม และยาง หรือในกระบวนการหมุนเวียนของเสียกลับมาใช้ใหม่ เช่น กระดาษและพลาสติก เป็นต้น

ฉ. Wet Grinding การลดขนาดโดยวิธีนี้จะใช้กับงานลดขนาดในสภาวะปกติไม่ได้ เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงสารพิษ หรืออนุภาคที่สามารถติดไฟได้จากการลดขนาด

2.7.3 การคัดแยกขนาด [9]

การคัดแยกขนาดจะอาศัยความแตกต่างของความละเอียดของอนุภาค ในการแยกอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ เทคนิคที่ใช้ในการแยกขนาดแบ่งได้เป็น

ก. การใช้ตะแกรงร่อน (Screening or Sieving) เป็นกระบวนการที่ให้ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสามารถผ่านตะแกรงที่ใช้เป็นเครื่องมือในการคัดขนาด อนุภาคที่ผ่านได้จะเรียกว่า Undersize อนุภาคที่เหลือด้านบนเรียกว่า Oversize เครื่องมือที่ใช้มีลักษณะเป็นตะแกรงแบบอยู่กับที่ หรือสั่นได้ เครื่องมือจะถูกออกแบบให้มีความลาดเอียงดังรูปที่ 2.11 ในทางอุตสาหกรรมสามารถคัดขนาดได้ตั้งแต่ 50-12,000 μm

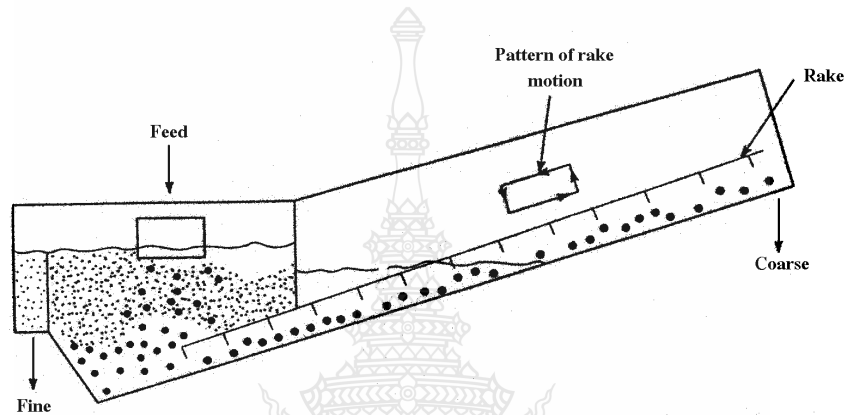


รูปที่ 2.11 ลักษณะของตะแกรงที่ใช้คัดขนาด [9]

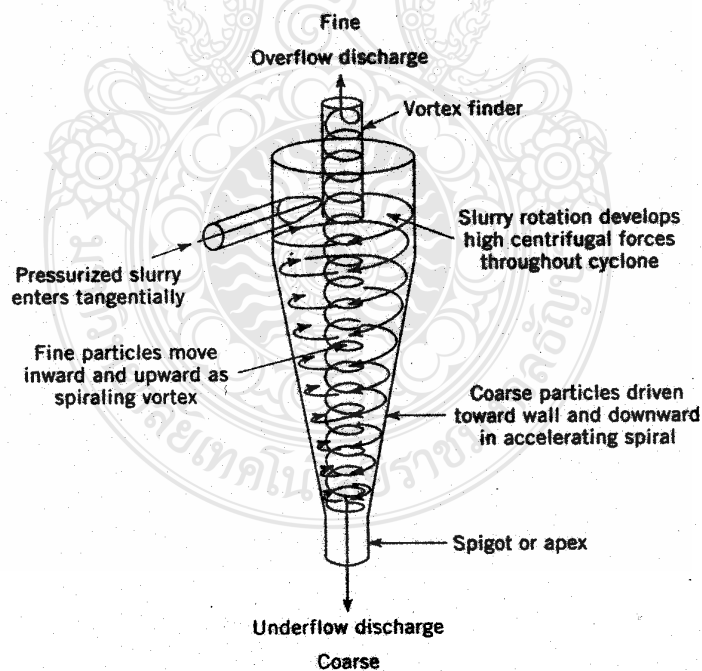
ข. การคัดแยกแบบเปียก (Wet Classification) เครื่องมือในการคัดแยกมีลักษณะดังรูปที่ 2.12 จะประกอบด้วยถังที่มีความลาดเอียงที่ให้อนุภาคขนาดเล็ก และน้ำสามารถไหลไปยังส่วนคัดขนาดขนาดอนุภาคที่คัดได้อยู่ในช่วง 25-150 μm โดยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอนุภาค

ค. Hydrocyclone เป็นเครื่องมือในการคัดแยกอนุภาคโดยอาศัยการคัดแยกแบบเปียก โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง และการหมุนวนของอนุภาค ลักษณะของเครื่องมือดังรูปที่ 2.13 ขนาดอนุภาคที่ได้ อยู่ใน ช่วง 5-30 μm

ง. Centrifuge เป็นการคัดแยกอนุภาคแบบเปียก ขนาดของอนุภาคที่ได้อยู่ในช่วง 5-8 μm ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตนม



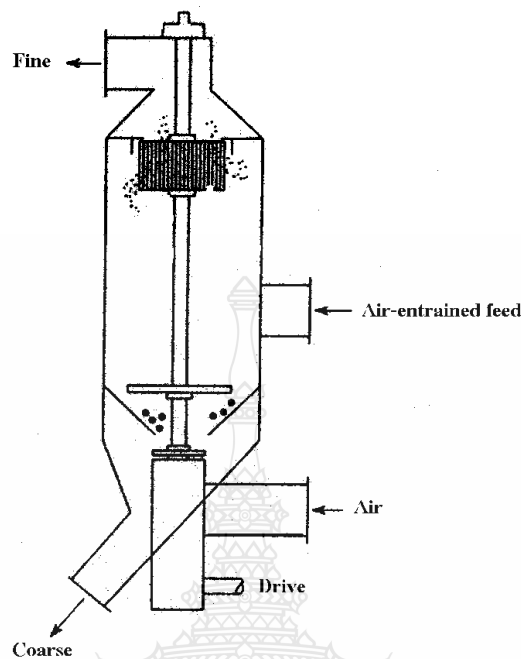
รูปที่ 2.12 เครื่องมือในการคัดแยกแบบเปียก [9]



รูปที่ 2.13 เครื่องมือคัดแยก Hydrocyclone [9]

จ. การคัดขนาดแบบแห้ง (Dry Classification) เป็นเทคนิคที่อาศัยแรงลมในการแยกอนุภาคได้ต่ำกว่า 100 μm เครื่องมือจะมีลักษณะเป็นไซโคลนดังรูปที่ 2.14 แรงหมุนจะทำให้อนุภาค

ขนาดใหญ่ชนผนังและตกลงไปด้านล่าง โดยที่อนุภาคขนาดเล็กจะไปตามแรงดันของอากาศออกไปทางด้านบนของไซโคลน



รูปที่ 2.14 ไซโคลนในการคัดขนาดแบบแห้ง [9]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การศึกษาเส้นใยผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับอะลูมิเนียมฟอยล์นำกลับมาใช้ใหม่ [10] โครงการนี้เป็นกรนำวัสดุที่เหลือใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมฟอยล์ มาเป็นสารตัวเติมในการผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ด้วยอัตราส่วนผสม 0-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดียว ได้ศึกษาปัจจัยในการผสม 2 ด้าน คือ ด้านปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอะลูมิเนียมฟอยล์ และด้านความเร็วรอบ จากการทดลองพบว่า อะลูมิเนียมฟอยล์สามารถนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงได้ แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอะลูมิเนียมฟอยล์มีความไม่เข้ากัน ปริมาณอะลูมิเนียมฟอยล์มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เมื่อมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมฟอยล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะผิวหยาบ ความแข็งแรงลดลง โมดูลัสลดลง และการยืดตัวลดลง โดยมีอุณหภูมิการหลอมเหลวจะอยู่ในช่วง 130 -140 °C เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ปริมาณอะลูมิเนียมฟอยล์และความเร็วรอบไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 115 -116 °C ซึ่งความเร็วรอบไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและการเกิดผลึกแต่มีผลทำให้การบวมตัวของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

2.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และ สมบัติของพอลิเอทิลีนที่ผสมกับเปลือกหอยแครง [11] ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเปลือกหอยแครงมาใช้เป็นสารตัวเติม ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติมาทำให้เกิดประโยชน์ โดยนำเปลือกหอยแครงไปบดให้ละเอียดแล้วนำมาผสมกับ LDPE เพื่อศึกษาสารตัวเติมที่ได้จากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ และหาความสัมพันธ์ระหว่าง

โครงสร้าง กระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิเอทิลีนที่ผสมกับเปลือกหอยแครง และผลในการเป็น การก่อผลึกสำหรับพอลิเมอร์ จากการทดลองพบว่าส่วนประกอบหลักของเปลือกหอยแครงบดได้แก่ CaCO_3 95 % ซึ่ง CaCO_3 ในเปลือกหอยแครงบดทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม เพื่อช่วยในการลดปริมาณ การใช้พอลิเมอร์ และมีลักษณะเป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ใน LDPE โดย carboxylic acid ที่มีอยู่ในเปลือกหอยแครงบด จะช่วยทำให้เปลือกหอยแครงบดมีการกระจายตัว และการยึดเกาะที่ดีกับ LDPE โดยเปลือกหอยแครงบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ $36 \mu\text{m}$ และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ แคบ แสดงว่าอนุภาคเปลือกหอยแครงบดมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อผสมระหว่าง LDPE กับเปลือก หอยแครงบด จะได้ค่าโมดูลัสสูงสุดที่ 136 MPa ที่ปริมาณเปลือกหอยแครงบด 30 wt% มีค่าความแข็ง (shore D) สูงสุดที่ 46 ที่ปริมาณเปลือกหอยแครงบด 40 wt% ซึ่งสารตัวเติมเปลือกหอยแครงบดทำให้ การยึดตัวที่จุดขาดของ LDPE ลดลง ขณะที่ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากไม่เปลี่ยนแปลง จาก การศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าเปลือกหอยแครงบดทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของ LDPE ลดลง และทำให้ LDPE มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของ LDPE ที่ผสมกับเปลือก หอยแครงบดเพิ่มขึ้นด้วย

2.8.3 Toughening of polypropylene by combined rubber system of ultrafine full-vulcanized powdered rubber and SB [12] งานวิจัยนี้เป็นการทำให้พอลิพรอพิลีนมีความแข็งแรง เพิ่มขึ้น โดยการเติม Ultrafine full-vulcanized powdered rubber (UFPR) และ SBS ผสมลงในพอลิพรอพิลีน โดยทำการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) อุณหภูมิที่ กระบอกรัดรีด $180-200^\circ\text{C}$ ความเร็วรอบเกลียวหนอนในการผสม 350 rpm. โดยมีการผสม UFPR และ SBS ในสัดส่วนต่างๆ จากนั้นนำวัสดุผสมที่ได้ไปตัดเป็นเม็ดและฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ มาตรฐาน จากนั้นนำไปทางทดสอบสมบัติทางกล ศึกษาโครงสร้าง และศึกษาการก่อผลึก จากการทดสอบ สมบัติทางกลพบว่า พอลิพรอพิลีนที่ผสมยาง UFPR/SBS ลงไป ค่าความแข็งแรงดึงมีการเปลี่ยนแปลง น้อย การยึดตัวที่จุดขาด, ค่าโมดูลัส, และความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้นสูงขึ้น กว่าพอลิพรอพิลีนบริ สุทธิ์ จากการศึกษาโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิด Transmission electron microscope (TEM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมยาง UFPR/SBS ลง ไป อนุภาคของยาง UFPR/SBS มีการกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของพอลิพรอพิลีน เป็นผลให้พอลิ พรอพิลีนผสมที่ได้มีความแข็งแรง และอนุภาคของยาง UFPR/SBS ทำให้เกิดการก่อผลึกขึ้น จาก การศึกษาทางด้านความร้อนโดยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) การเติม UFPR/SBS ทำให้เกิดการก่อผลึกขึ้นในพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้น โดย UFPR ส่งผลในการช่วยให้เกิดการก่อ ผลึกของพอลิพรอพิลีนมากกว่า SBS จากการเกิดผลึกมากขึ้นส่งผลให้พอลิพรอพิลีนผสมที่ได้ มีความ แข็งและความต้านทานความร้อนสูงขึ้น

2.8.4 Mechanical and thermal properties of zinc powder filled high density polyethylene composites [13] งานวิจัยนี้การการทดสอบวัสดุผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นสูงกับผงสังกะสีบดละเอียดมีขนาดอนุภาคใหญ่สุด $5 \mu\text{m}$ ผสมโดยการบดมันขึ้นรูปพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงให้เป็นแผ่น ใช้เวลาผสม 10 นาที หลังจากนั้นเติมผงสังกะสีลงไป โดยเติมผง สังกะสีตั้งแต่ 0-20% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกลและความร้อนเปรียบเทียบกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ได้เติมผงสังกะสี จากการทดลองพิสูจน์ให้เห็นว่า การเติมผง สังกะสีในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง สมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ เติมผงสังกะสี โดยมีประเด็นยกเว้น 2 ข้อ มีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง โดยค่าสูงสุดอยู่ที่การเติมผง

สังกะสี 4 % และค่ายังมอดูลัสสูงสุดอยู่ที่การเติมผงสังกะสี 14 % ความหนาแน่นและความแข็งของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมกับผงสังกะสี สูงขึ้นกว่าที่ไม่ได้เติมผงสังกะสี มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการผสมที่เพิ่มขึ้น ความเสถียรของความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงสังกะสีที่สูงขึ้น การรวมตัวกันของผงสังกะสีในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงส่งผลให้อุณหภูมิการแพร่กระจายความร้อนและนำความร้อนเพิ่มขึ้น และค่าความร้อนจำเพาะลดลง

2.8.5 Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites [14] งานวิจัยนี้เป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นเชิงต่ำ(LLDP) ผสมกับผงทองแดง ซึ่งผงทองแดงมีอนุภาคเล็กกว่า $38 \mu\text{m}$ ผสมในเครื่อง Brabender Plastograph ในอัตราส่วนที่ต่างกันโดยเติมผงทองแดงในพอลิเมอร์ทั้งสองตั้งแต่ 0-24 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทดสอบทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC และ TGA ทดสอบสมบัติทดสอบทางกลโดยการทดสอบดึง ค่าการนำไฟฟ้า และค่าการนำความร้อน จากการทดลองจะพบว่า การกระจายตัวของอนุภาคผงทองแดงในพอลิเมอร์เทียบกับการก่อตัวของพอลิเมอร์ทั้งสอง ที่ปริมาณเติมผงทองแดงสูงมีการกระจายตัวต่ำ โดยอนุภาคผงทองแดงจะเกาะตัวกันมากที่การเติมปริมาณผงทองแดงสูงขึ้น การผสมทองแดงเข้าไปมีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเล็กน้อย จากการหลอมเหลวผลรวมของพลังงาน(enthalpy) พบว่าอนุภาคของทองแดงก่อให้เกิดนิวเคลียส ทำให้พอลิเอทิลีนเกิดผลึกของคริสตัลไลน์เพิ่มขึ้น ความเสถียรของอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมผงทองแดงดีกว่าที่ไม่ได้เติมผงทองแดง ส่วนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีความเสถียรที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณการผสมผงทองแดงต่ำเท่านั้น จากการทดสอบแรงดึงพบว่ามีสมบัติคล้ายวัสดุผสมทั่วไป คือจะมีสมบัติทางกลที่ไม่ดี (นอกจากค่า ยังมอดูลัส) เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติม อุณหภูมิและการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุผสมมีค่าสูงขึ้นกว่าพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ การนำไฟฟ้าที่ดีของพอลิเมอร์ทั้งสองอยู่ที่ปริมาณการผสม 18.7 %

2.8.6 Study of the tribological synergistic effects in nano CuO-filled and fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites [15] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสึกหลอและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุผสม ระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์(CuO) ที่มีอนุภาคนาโน และเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนีลีนซัลไฟด์(PPS) ซึ่งผสมโดยการอัดขึ้นรูปโดยอนุภาคของ CuO มีขนาด 16-32 nm. เส้นใยเสริมแรงเป็นเส้นใยคาร์บอนสั้นๆ(CF) มีขนาด $7 \mu\text{m}$ และยาว 6 mm. และเส้นใย โพลีอะรามิด (Kevlar) โดยมีสัดส่วนการเติมสารตัวเติมที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1-4 % และวัสดุเสริมแรงตั้งแต่ 5-15% สำหรับการวัดปริมาณการสึกหลอ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน วัดจากวิธีการเคลื่อนที่ไปมาแบบ pin-on-disk พื้นผิวของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการเสียดทานทำจากเหล็กกล้า มีความแข็ง 55-60 HRC และมีความราบเรียบผิว $0.09-0.11 \mu\text{m}$ ทดสอบโดยให้ผิวชิ้นงานทดสอบเคลื่อนที่เลื่อนไปมาสัมผัสกับผิวเครื่องมือทดสอบด้วยความเร็ว 1 m/s ใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขมีการเคลื่อนที่ในการเสียดสออย่างคงที่ จากการทดลองพบว่าในส่วนของสารตัวเติม มีการอัตราการสึกหลอต่ำคงที่ ที่วัสดุผสม PPS + 2%CuO และในส่วนของเส้นใยเสริมแรง ที่วัสดุผสม PPS + 10% Kevlar อนุภาคของสารตัวเติม CuO ไม่ส่งผลมากต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ขณะที่ในส่วนของ PPS ที่ผสม เส้นใยเสริมแรง CF ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงครึ่งหนึ่ง อัตราการสึกหลอมีค่าต่ำลงอย่างคงที่เมื่อมีการผสมอนุภาค CuO ขนาดนาโน การผสมเส้นใยเสริมแรง Kevlar ใดๆๆ มีค่า

สัมประสิทธิ์ความเสียหายไม่เปลี่ยนแปลงมาก CuO ที่เติมลงในพอลิเมอร์ กับ เส้นใย Kevlar ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเพิ่มขึ้น แต่การเติมเส้นใยคาร์บอน (CF) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของผิวเนื้อเยื่อวัสดุผสมโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) สำหรับวัสดุผสมชนิดที่มีความราบเรียบ เนื้อเยื่อจะมีการบีบอัดตัวกัน ทำให้มีอัตราการสึกหลอต่ำ และจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเยื่อบางๆมีการเกาะตัวกัน ทำให้อัตราการสึกหลอตกลงคงที่

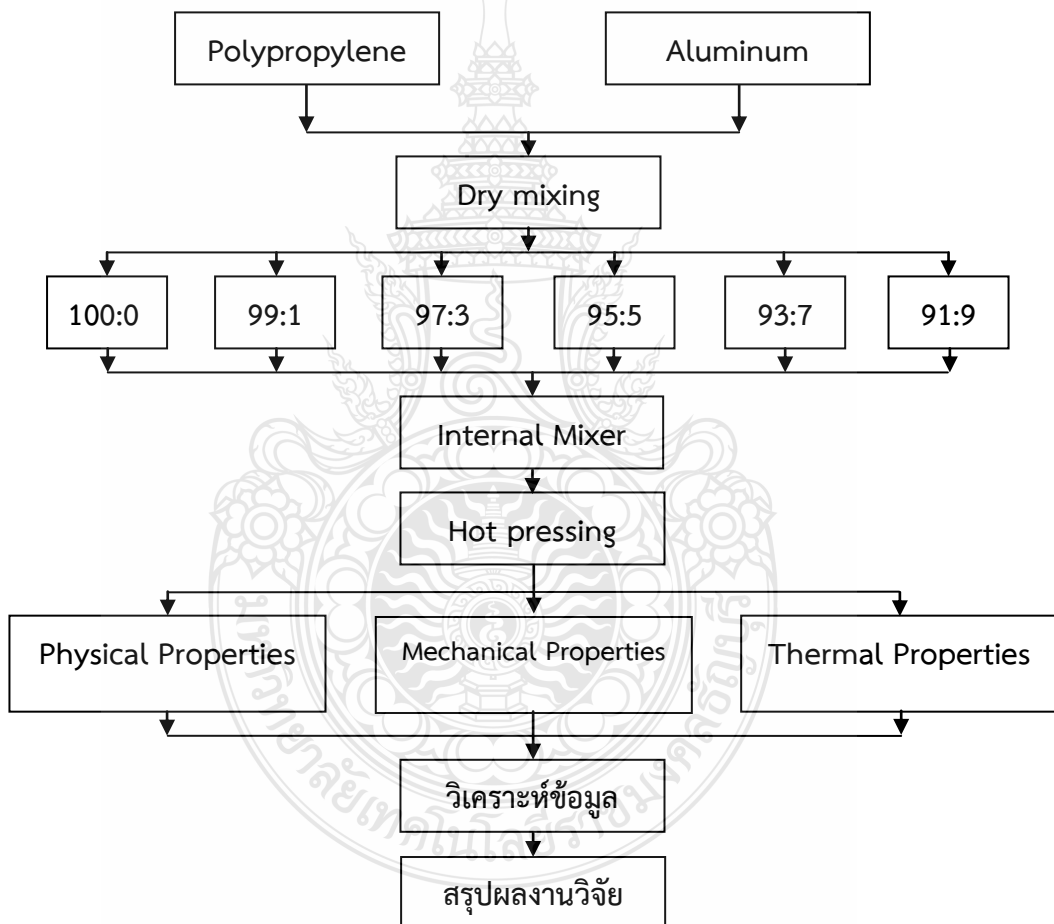


บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

หัวข้อในการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็นวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ พร้อมด้วยแนวทางในการดำเนินงานวิจัย การเตรียมสารตัวเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน และการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผสมกับสารตัวเติม ดังต่อไปนี้

3.1 แผนภาพการไหลของขั้นตอนการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยและการทดลองดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพทางผู้วิจัยจึงได้วางแผนการดำเนินการทดลองและวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.2.1 วัสดุและสารเคมี

ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุและสารเคมี	เกรด / ชื่อทางการค้า	บริษัท
1. เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีน	H255JA	SCG
2. ขี้ตะกรันอะลูมิเนียม (Dross)	Al ₂ O ₃	ENKAI THAI

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเม็ดพลาสติก [16]

สมบัติ	หน่วย	PP เกรด H255JA
Melt flow rate at 190 °C, 2.16 kg	g/10 min	11.00
ความหนาแน่น (Density)	g/cm ³	0.958
Flexural	kg/cm ²	11,500
Notched Izod Impact	Kg.cm/cm	3
Hardness	Shore D	65
Melting Point	°C	130
Vicat Softening Point	°C	122
Brittleness Temperature	°C	-60



รูปที่ 3.2 เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีน PP เกรด H255JA

3.2.2 เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ	บริษัท / รุ่น
1. ปั่น	PEDROLLO / CPM158
2. Sieve shaker	Fritch
3. Ball Mill	Fritsch
4. Internal mixer	Lab Tech Engineering
5. X-ray diffractometer	XRD 6000
6. Single screw extruder	Polydrive with Rheomex R25
7. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก	Lab Tech Engineering
8. เตาอบ	SFL / EC67A
9. Compression molding	Lab Tech Engineering
10. Tensile Tester	Monsanto / T2000
11. Mastersizer S	Malvern Instruments
12. Hardness tester (Shore Durometer Type D)	ATSFAAR
13. Differential Scanning Calorimeter (DSC)	Perkin Elmer / DSC 7
14. Scanning Electron Microscope	JEOL / JSM-5800
15. เครื่องทดสอบการเสียดทาน	Lab Tech Engineering

3.3 สารตัวเติม

3.3.1 ชี้ตะกั่วอะลูมิเนียม (อะลูมิเนียมออกไซด์, Dross, Al_2O_3)

ก. ชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมบดละเอียด

- นำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมที่ได้จากบริษัท (รูป 3.3) มากำจัดสิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอม

- นำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมไปแช่น้ำแล้วรินน้ำออก ทำซ้ำเรื่อยๆ จนน้ำที่แช่ชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมใสไม่ขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.4

- นำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมจากข้อ 2 ไปตากแดดให้แห้ง

- นำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ไปทุบด้วยค้อนให้มีขนาดเล็ก

- นำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมที่ได้จากข้อ 4 ไปผ่านเครื่องร่อน (Sieve Shaker) (ข้อ 2 ในตารางที่ 3.3) โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 1mm เพื่อนำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมไปบดละเอียด

- นำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมที่ได้จากข้อ 5 ไปบดละเอียดโดยใช้เครื่องบดขนาดด้วยลูกบด (Ball Mill) (ข้อ 3 ในตารางที่ 3.3) ใช้เวลาในการบดประมาณ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 3.5

- นำชี้ตะกั่วอะลูมิเนียมบดละเอียดจากข้อ 6 ไปคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน

- ขนาด 200 เมช (ข้อ 2 ในตารางที่ 3.3) ดังแสดงในรูป 3.5 เครื่องบดลดขนาดด้วยลูกบด รูปที่ 3.6 เครื่องร่อนคัดแยกขนาด รูปที่ 3.7 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาด 200 เมช และรูปที่ 3.8 ความละเอียดของตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาด 200 เมช
- เก็บซีตระกัณอะลูมิเนียมบดละเอียดที่ได้ไว้ในกล่องพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซีตระกัณอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัดขนาด



รูปที่ 3.3 ซีตระกัณอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.4 การล้างทำความสะอาดซีตระกัณอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.5 เครื่องบดลดขนาดวัตถุด้วยลูกบด (Ball Mill)



รูปที่ 3.6 เครื่องร่อนคัดแยกขนาด



รูปที่ 3.7 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาด 200 เมช



รูปที่ 3.8 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาด 200 เมช



รูปที่ 3.9 ซีตระกันอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัลดขนาด

3.3.2 การวิเคราะห์สารตัวเติมอะลูมิเนียมออกไซด์บดละเอียด

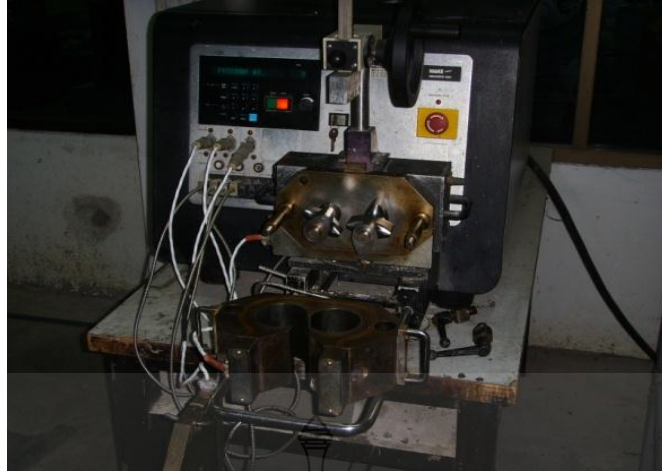
ก. การศึกษาส่วนประกอบทางเคมี วิเคราะห์โครงสร้างส่วนประกอบทางเคมีของซีตระกันอะลูมิเนียมจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) จากเครื่อง X-Ray Diffractometer (ข้อ 5 ในตารางที่ 3.3) โดย x-ray ได้จาก $\text{CuK}\alpha$ ที่ความต่างศักย์ 30 kV และกระแส 30 mA บันทึก X-ray Diffraction Pattern ที่มุม 0 ถึง 90 องศา (2θ) แล้วนำ Diffraction Pattern ที่ได้ไปหาโครงสร้าง โดยเทียบกับ JPCDS

ข. การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของสารตัวเติม ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของซีตระกันอะลูมิเนียมบด (Al_2O_3) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงด้วยเครื่อง Mastersizer S (ข้อ 11 ในตารางที่ 3.3) โดยอาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนของแสง ใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมครอน เมื่อมีอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางผ่านลำแสงชั่วระยะเวลาหนึ่งโดยการใช้สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนกลับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค การใช้ตัวกรองแสง เลนส์ และตัวตรวจจับทางแสงร่วมกับคอมพิวเตอร์ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาค [17]

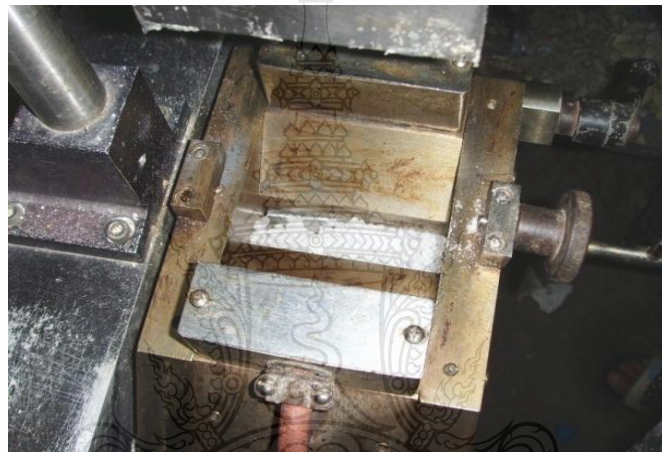
3.4 การผสมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีน กับสารตัวเติม

3.4.1 การผสมในเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer)

นำพอลิเมอร์ได้แก่พอลิพรอพิลีนผสมกับสารตัวเติมซีตระกันอะลูมิเนียมบดละเอียด (Al_2O_3) ผสมกันในเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ดังแสดงรูปเครื่องผสมภายในที่รูป 3.10 ที่อุณหภูมิการผสม 220 °C รอบการผสม 40 รอบต่อนาที ใช้เวลาการผสม 5 นาที โดยใช้สัดส่วนการผสมซีตระกันอะลูมิเนียมที่ 1, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ที่ผสมที่ได้จากเครื่องผสมภายใน จะถูกทำให้เย็นตัวในอากาศ และทำการตัดเป็นเม็ดโดยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบในเตาอบ (ข้อ 8 ในตารางที่ 3.3) เพื่อกำจัดความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูป โดยมีขั้นผสมดังนี้ คือ



รูปที่ 3.10 เครื่องผสมภายใน (Internal Mixer)



รูปที่ 3.11 ใส่เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนลงในเครื่องผสมภายใน



รูปที่ 3.12 ใส่ซีตกระถันอะลูมิเนียมมบดลงไปผสมกับพอลิพรอพิลีน

นำเม็ดพอลิพรอพิลีนใส่ในเครื่องผสมภายในที่ตั้งอุณหภูมิและความเร็วรอบการผสมไว้แล้วดังรูปที่ 3.11 จากนั้นเติมซีตกระถันอะลูมิเนียมลงไปผสมกับพอลิพรอพิลีนในเครื่องผสมภายใน ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นรอให้พอลิพรอพิลีนกับซีตกระถันอะลูมิเนียมผสมกันในเครื่องเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบ 5 นาที เปิดฝานำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกจากเครื่องผสมภายใน ดังแสดงในรูป 3.13 จากนั้นรอให้เย็นตัวใน

อากาศแล้วนำไปตัดให้เป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ดังแสดงในรูป 3.14 เมื่อผ่านจากเครื่องตัดพลาสติกจะได้เม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตอะกรีนอะลูมิเนียม ดังแสดงรูปเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่สกัดส่วนต่างๆ จากการผ่านการผสมในเครื่องผสมภายในแล้วตัดเป็นเม็ด ดังในรูป 3.15, 3.16, 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.13 วัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตอะกรีนอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.14 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก



รูป 3.15 พอลิพรอพิลีน 100% จากการผสมในเครื่องผสมภายใน



รูปที่ 3.16 พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตตระกรันอลูมิเนียมเนียม 1 wt%



รูปที่ 3.17 พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตตระกรันอลูมิเนียมเนียม 5 wt%

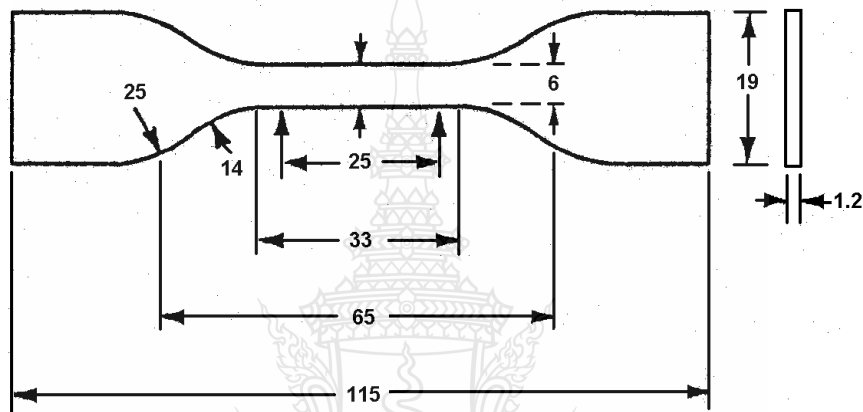


รูปที่ 3.18 พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตตระกรันอลูมิเนียมเนียม 7 wt%

3.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

ก. การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ผสมได้ไปขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปร้อน (Compression Molding) โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV [18] ดังรูปที่ 3.19 ใช้แม่พิมพ์รูปดัมเบลในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.20 ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ดังรูปที่ 3.21 (ข้อ 9 ในตารางที่ 3.3) อุณหภูมิในการขึ้นรูป 170 °C ที่แรงดัน 10 ตัน ให้ความร้อนก่อนอัดขึ้นรูป (Preheating) 8 นาที เวลาในการอัดขึ้นรูป (Pressing) 5 นาที และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid Cooling) โดยแทนหล่อเย็นเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นรอให้ชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง โดยมีชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV ที่ขึ้นรูปแล้ว ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.19 ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงดึงตาม ASTM D 638 type IV



รูปที่ 3.20 แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV

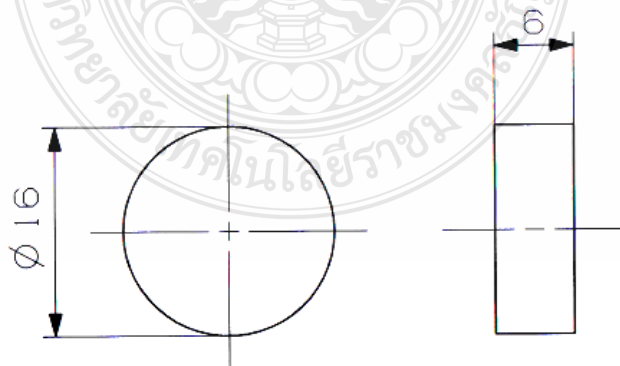


รูปที่ 3.21 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV

ข. การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบความเสียดทาน (Abrasion Testing)



รูปที่ 3.23 ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบความเสียดทานตาม DIN 53516

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ผสมได้ไปขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปร้อน (Compression Molding) โดยขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยชิ้นงานทดสอบจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก $\varnothing 16$ mm สูง 6 mm ดังรูปที่ 3.23 ขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูปร้อน โดยใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปดังแสดงรูปที่ 3.24 อุณหภูมิในการขึ้นรูป 170°C ที่แรงดัน 10 ตัน ให้ความร้อนก่อนอัดขึ้นรูป (Preheating) 8 นาที เวลาในการอัดขึ้นรูป (Pressing) 5 นาที โดยมีชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516 ที่ขึ้นรูปแล้วดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516

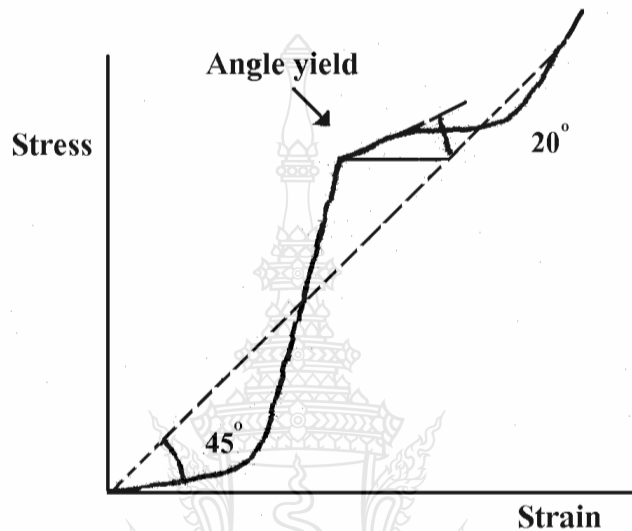
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) [18]

ทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 จากชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบล โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester) ดังรูปที่ 3.28 (ข้อ 10 ในตารางที่ 3.3) ที่โหลดเซล (Load cell) 100 N ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min ดึงชิ้นงานจนขาด ดังรูป 3.29 และ 3.30 เครื่องจะบันทึกแรง (Force) และระยะทางที่ยืด (Displacement) โดยซอฟต์แวร์ของเครื่อง ทำการทดสอบแต่ละตัวอย่างด้วยชิ้นงานทดสอบ 5 ชิ้น โดยศึกษาความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield Stress) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break) ของชิ้นงาน ซึ่งค่าต่าง ๆ จะได้จากซอฟต์แวร์ Tension General Purpose Test Program

ก. ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield Stress)

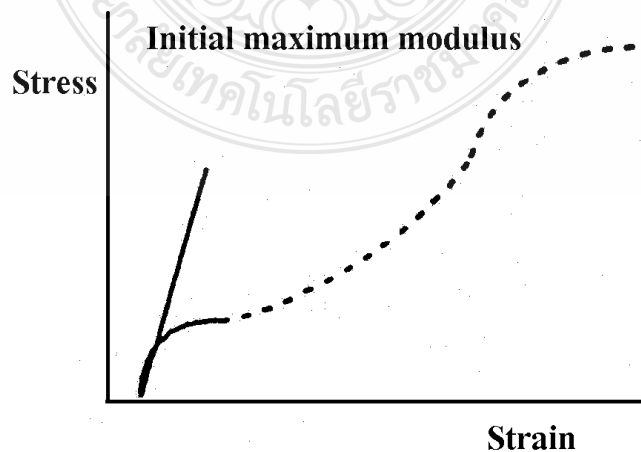
สามารถคำนวณหาความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก โดยใช้ Angle Yield ในการกำหนดจุดยิลด์ (Yield Point) โดยที่มุมยิลด์ (Angle Yield) เกิดขึ้นจากการที่ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดมีลักษณะทำมุมกับแนวเส้นตรงดังรูปที่ 3.26 และเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากที่ได้จากการกำหนดจุดมุมยิลด์ (Angle Yield) มีค่าเท่ากับความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังนั้นผลการทดลองจึงใช้ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ที่ได้จากมุมยิลด์ (Angle Yield)



รูปที่ 3.26 ลักษณะของมุมยิลด์ที่ใช้กำหนดจุดความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก [18]

ข. มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

ค่ามอดูลัสเป็นค่าจาก Initial Maximum Modulus โดยการคำนวณจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ดังรูปที่ 3.27 ซึ่งค่าที่ได้เรียกว่า ยิงส์มอดูลัส มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)



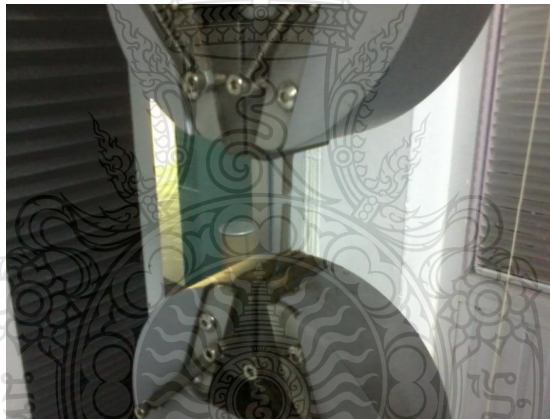
รูปที่ 3.27 ลักษณะของกราฟที่ใช้ในการคำนวณหา Initial Maximum Modulus [18]

ค. เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

% การยืดตัวที่จุดขาดได้จากการคำนวณโดยซอฟต์แวร์ของเครื่องทดสอบแรงดึง โดยกำหนด Break Strain เป็นจุดที่ชิ้นงานขาด



รูปที่ 3.28 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.29 การทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.30 ชิ้นงานทดสอบจากการทดสอบแรงดึง

3.5.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ใช้วิธีการทดสอบความแข็ง Shore Sclerocscope วัดความแข็งในเทอมความยืดหยุ่นของวัสดุ ทดสอบโดยปล่อยหัวค้อนปลายเพชร (ขนาด 40 เกรน; 2.5 กรัม; 0.0914 ออนซ์) ตกด้วยน้ำหนักของตัวเองและจากความสูงที่ทราบค่า (10 นิ้ว; 254 มิลลิเมตร) ในท่อแก้ว ความสูงที่กระดอนกลับวัดได้จากสเกลที่ได้แบ่งเป็น 100 ส่วน ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยจากการกระดอนของเหล็กกล้าคาร์บอนชุบแข็งที่สมบูรณ์ สเกลมากกว่า 100 จะเป็นโลหะที่มีความแข็งมากเกิน ค่าความแข็งขึ้นอยู่กับความสูงที่กระดอนกลับของหัวค้อน วัสดุที่แข็ง ความสูงกระดอนจะมาก ความแข็งก็จะมาก วัสดุที่อ่อน ความสูงกระดอนจะน้อย ความแข็งก็จะน้อย

การทดสอบแบบ Shore Durometer ใช้หัวกดชุบแข็ง สปริงที่ได้ปรับค่าอย่างถูกต้อง ความลึกของหัวกด และแผ่นกด หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกดและมีระยะยึดตัว 2.5 มม. จากผิวของฐาน ตำแหน่งระยะยึดตัวเต็มที่จะมีขีดแสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแนบติดผิวหน้าฐานกด ตัวบ่งชี้แสดงค่า 100 ดังนั้นทุกๆ จุดของ Shore มีค่าเท่ากับ ระยะกด 0.0025 มม. (สเกล M เท่ากับ 0.00125 มม.)

ตารางที่ 3.4 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore Durometer ชนิด A และ D

เครื่องทดสอบ - Shore Durometer Type A and D		
Durometer	แผ่นกด (Indenting foot)	ภาระที่ใช้ (กรัม)
Type A	แท่งเหล็กชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มม. - 1.4 มม. ปลายรูปกรวย มุม 35 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.79 มม.	822
Type D	แท่งเหล็กชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มม. - 1.4 มม. ปลายรูปกรวย มุม 30 องศา รัศมีปลาย 0.1 มม.	4550

การทดสอบความแข็งพลาสติกส่วนมาก วัดด้วยการทดสอบ Shore Durometer หรือการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ ทั้งสองวิธีวัดความต้านทานของพลาสติกต่อรอยกด ทั้งสองสเกลให้ค่าความแข็งตามหลักการไม่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและคุณลักษณะพื้นฐาน ความแข็ง Shore A หรือ D เป็นวิธีที่นิยมใช้ สำหรับยาง อีลาสโตเมอร์ และปกติใช้กับพลาสติกอ่อน เช่น พอลิโอฟีน พลูออโรพอลิเมอร์ และไวนิล Shore A ใช้สำหรับยางอ่อน ในขณะที่ Shore D ใช้สำหรับยางที่แข็งกว่า ความแข็ง Shore A คือค่าความแข็งสัมพัทธ์ของวัสดุยืดหยุ่น เช่น ยาง หรือพลาสติกอ่อน สามารถที่จะหาได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Shore A Durometer เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางและพลาสติก การอ่านค่าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นเวลาการกดบางครั้งจะถูกรายงานร่วมกับค่าความแข็ง

โดยทำการวัดความแข็งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตตระกันอะลูมิเนียม ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบชอร์ดูโรมิเตอร์แบบสเกลดี (Shore Durometer Type D) ดังในรูป 3.31 (ข้อ 12 ในตารางที่ 3.3) โดยนำชิ้นงานวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นกดน้ำหนักของเครื่องวัดความแข็งลงบนชิ้นงาน ดังในรูป 3.32 ใช้เวลาในการกด 15 วินาที และทำการบันทึกค่าความแข็งที่ได้ โดยเลือกจุดในการทดสอบ 5 จุด



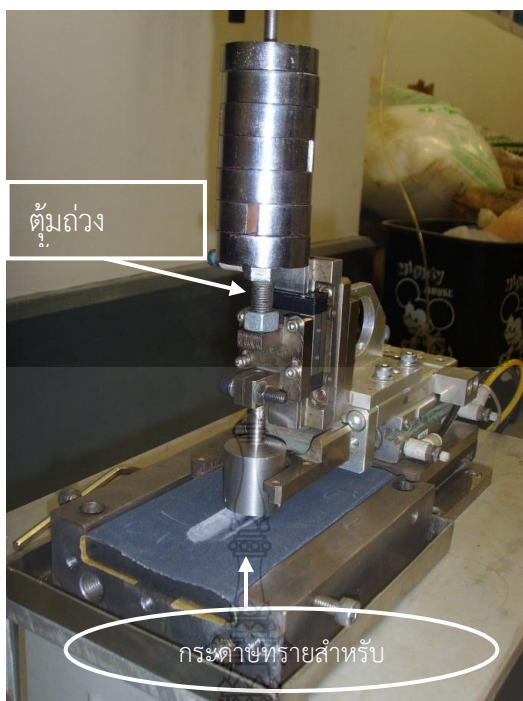
รูปที่ 3.31 เครื่องทดสอบความแข็งชอร์ดูโรมิเตอร์แบบสเกลดี



รูปที่ 3.32 การวัดค่าความแข็ง

3.5.3 การทดสอบความเสียดทาน (Abrasion Testing)

ในการทดสอบการสึกหรอผู้วิจัยได้จัดสร้างทดสอบการเสียดทานโดยมีลักษณะเครื่องดังรูป 3.33 และ 3.34 (ข้อ 15 ในตารางที่ 3.3) เพื่อทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่เตรียมได้กับ ชิ้นงานที่เป็นพอลิพรอพิลีน โดยใช้เปรี๊ยะในงานวิจัยนี้โดยเฉพาะ โดยจะทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยนำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมได้ไปใส่ในแป้นจับยึดชิ้นงาน ดังในรูป 3.35 โดยผิวหน้าชิ้นงานจะถูกวางบนกระดาษทราย ซึ่งบนแป้นจับชิ้นงานจะมีแกนเหล็กสำหรับใส่ตุ้มถ่วงน้ำหนักเพื่อกดทับชิ้นงาน จากนั้นจะกดสวิทช์ให้เครื่องทำงาน โดยเครื่องจะเคลื่อนที่ เติมน้ำหนัก - ถอยหลัง ด้วยระบบนิวแมติก โดยไม่ยกชิ้นงานในจังหวะถอยกลับ โดยวิเคราะห์ความเสียดทานจากน้ำหนักที่หายไป จำนวนทดสอบ 400 รอบใช้น้ำหนักกดทับ 20N ความเร็วรอบ 1 รอบ/วินาที ระยะชัก 500 mm. กระดาษทรายสำหรับขัดเบอร์ 600



รูปที่ 3.33 เครื่องทดสอบความเสียดทาน

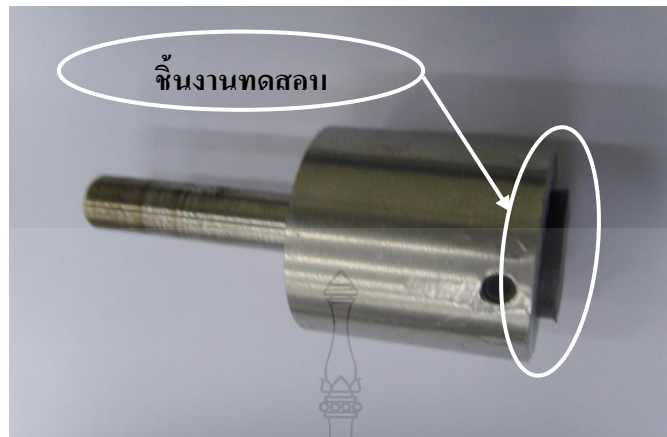


รูปที่ 3.34 เครื่องทดสอบความเสียดทาน

3.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนจากเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ จากเทคนิค DSC โดยเครื่อง Perkin Elmer DSC 7 (ข้อ 13 ในตารางที่ 3.2) ตัดชิ้นงานตัวอย่าง ประมาณ 10 mg ใส่ลงในภาชนะทดสอบที่ทำจาก อะลูมิเนียม (Aluminum Pan) ทำการเทียบอุณหภูมิ (Calibrate) โดยใช้ Indium ในการทดสอบจะให้ความร้อนกับตัวอย่างจาก 50-200 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 20 °C/min และอยู่ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวจาก 200-50 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 5 °C/min บันทึก

Melting Temperature (T_m), Crystallization Temperature (T_c) และ Melting Enthalpy (Heat of Fusion, ΔH_f) โดยคำนวณหา % Crystallinity ได้จากสมการที่ 3.1 [8]



รูปที่ 3.35 การจับชิ้นงานทดสอบความเสียดทาน

$$\% \text{ crystallinity} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_{f100}} \quad (3.1)$$

ΔH_f = Heat of Fusion ของพอลิเมอร์ (J/g)

ΔH_{f100} = Heat of Fusion ที่ 100% ของพอลิเมอร์ (J/g)

ΔH_{f100} = ของพอลิพรอพิลีน = 189 J/g [3]

3.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ โดยศึกษาลักษณะของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมซึ่งตะกั่วอะลูมิเนียม และศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมบนโครงสร้างของพอลิเมอร์ (Polymer matrix) จากตัวอย่างชิ้นงานที่หักในไนโตรเจนเหลว และทำการเคลือบผิวด้วยทองคำบนที่ภาพบริเวณรอยหักของวัสดุผสม (Secondary Electron Image) จาก JEOL Scanning Electron Microscope (ข้อ 14 ในตารางที่ 3.2) ที่ความต่างศักย์ 20 kV

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการดำเนินงานวิจัยพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้น ซึ่งได้ทำการแก้ไข เพื่อดำเนินการวิจัยได้ตามวัตถุประสงค์ โดยกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ตามหัวข้อต่อไปนี้

4.1 สารตัวเติมซีตตระกรันอะลูมิเนียม (Dross, Al_2O_3)

4.1.1 การบดและคัดแยกขนาดซีตตระกรันอะลูมิเนียม

ซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่นำมาใช้เป็นซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่เหลือใช้จากกระบวนการหล่อฉีดของบริษัท เอนโก ไทย จำกัด ซึ่งอะลูมิเนียมที่ใช้หล่อดีนั้นเป็นอะลูมิเนียมเกรด A356 มีองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียม (Al) ที่ผสม 7% ซิลิกอน (Si) และ 3% แมกนีเซียม (Mg) (ภาคผนวก ข ตาราง ข-10)

โดยขนาดของซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดที่ได้จากเครื่องบดลดขนาดด้วยลูกบดสามารถคัดขนาดได้จากตะแกรงร่อน (Sieve) ทั้งหมด 5 ขนาด คือ 90 เมช ($178\mu m$), 120 เมช ($125\mu m$), 150 เมช ($104\mu m$), 180 เมช ($89\mu m$) และ 200 เมช ($75\mu m$) จากการทดลองเลือกขนาดซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในการผสมในพอลิพรอพิลีนเบื้องต้น (ภาคผนวก ก หัวข้อที่ 3 การเลือกขนาดอนุภาคซีตตระกรันอะลูมิเนียม) พบว่าซีตตระกรันอะลูมิเนียมขนาด 200 เมช ($75\mu m$) ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่สามารถคัดขนาดได้ โดยมีค่าการทดสอบแรงดึงดีที่สุดในทางผู้วิจัยจึงใช้ซีตตระกรันอะลูมิเนียมขนาด $75\mu m$ ใช้ในการทดลองอย่างละเอียดต่อไป

จากการคัดขนาด ซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่า 200 เมช มีอนุภาคเป็นฝุ่นผงเกือบทั้งหมด ซึ่งฝุ่นผงเหล่านี้ละลายไปกับน้ำในขั้นตอนการล้างทำความสะอาด โดยซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่เตรียมได้มีเป็นฝุ่นผงสีเทาดำ

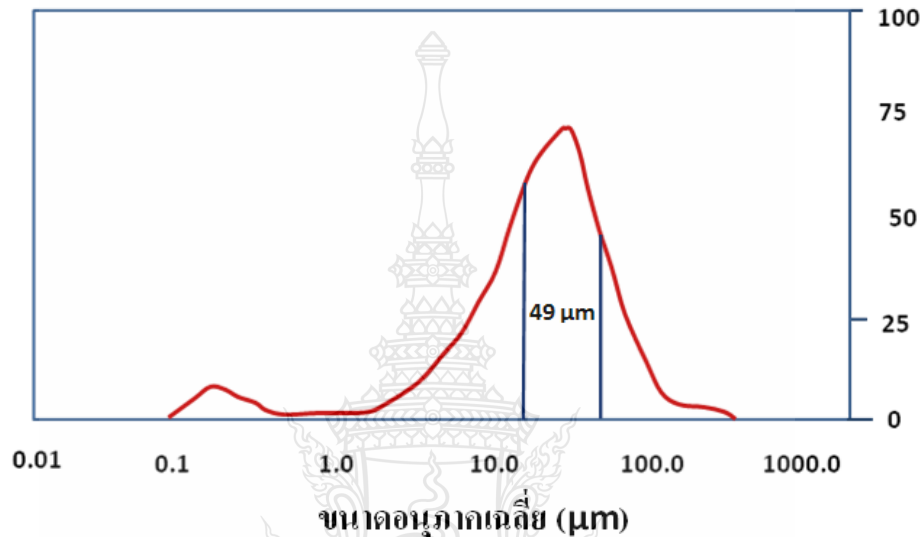


รูปที่ 4.1 ซีตตระกรันอะลูมิเนียมขนาด $75\mu m$ ที่ได้จากการบดและคัดขนาด

4.1.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซีตตระกรันอะลูมิเนียม

นำซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัดแยกขนาดจากข้อ 4.1 มาทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซีตตระกรันอะลูมิเนียม โดยนำซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ขนาดด้วยเครื่อง มาสเตอร์ไซส์เซอร์ เอส (Mastersizer S) จากการวิเคราะห์ของเครื่องพบว่า ขนาด

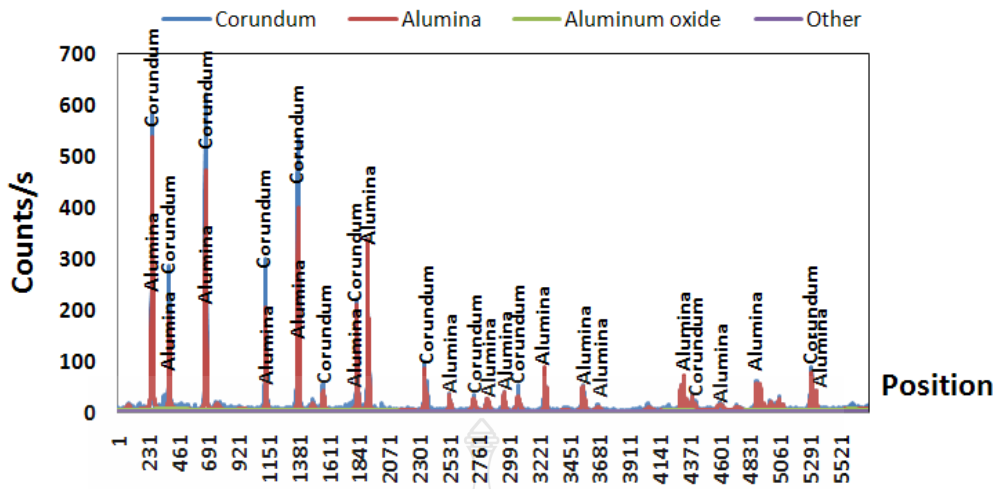
อนุภาคเฉลี่ยของซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดอยู่ที่ประมาณ 49 μm และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ดังรูปที่ 4.2 จากรูปพบว่าขนาดอนุภาคของซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดมีการกระจายตัวในช่วงแคบ ซึ่งขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ด้วย โดยที่สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ ส่งผลให้มีความหนืดในการผสมสูงกว่า สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ หรือมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วงกว้าง ผลการทดลองที่แสดงนี้มีผลการทดลองคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุ่มสอน [11] ว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ ส่งผลให้มีความหนืดในการผสมสูงกว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดจากเครื่องมาสเตอร์ไซต์เซอร์ เอส

4.1.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของซีตตระกรันอะลูมิเนียม

นำซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่บดและคัดขนาดจากตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช มาทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของซีตตระกรันอะลูมิเนียม โดยวิเคราะห์จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) จากการวิเคราะห์พบว่าส่วนประกอบหลักของซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ทดลองนี้มีส่วนประกอบเกือบทั้งหมดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งอะลูมิเนียมออกไซด์ที่พบอยู่ในรูปของคอร์รันดัม (Corundum) และอลูมินา (Alumina) 77.9% และมีธาตุอื่น เช่น สังกะสี, ซิลิกอน, แคลเซียม, ทองแดง, ลิเทียม, ออกไซด์ของเหล็ก, โพแทสเซียม ผสมอยู่เล็กน้อย (ตารางที่ ข-9 ในภาคผนวก ข) รูปที่ 4.3 เป็นค่าระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก (d-spacing) ที่ค่าความสัมพันธ์ของความเข้มชั้นพลังงานที่สูงที่สุด (Relative intensity) 3 พีค (Corundum, Alumina, Aluminum oxide) เทียบกับข้อมูลธาตุมาตรฐาน Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDF) ของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีหลักของซีตตระกรันอะลูมิเนียม (Dross)

4.2 อิทธิพลของปริมาณซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่มีผลต่อ สมบัติทางกายภาพ

4.2.1 ลักษณะการผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียม

ก. ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสม

จากการทดลองผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมเบื้องต้นด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว เพื่อหาช่วงการผสมที่เหมาะสม โดยสุ่มเลือกการผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียมในพอลิพรอพิลีน ที่ 10, 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าช่วงที่เหมาะสมอยู่ในช่วงที่ผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียมไม่เกิน 10 % (ภาคผนวก ก หัวข้อที่ 2 การเลือกช่วงการผสม) สอดคล้องกับ อรุษา สรวารี [5] ว่าวัสดุประเภทสารเสริมแรงหรือวัสดุที่มีความแข็งจะนำมาใช้ผสมในพอลิเมอร์ในปริมาณที่น้อย เพราะสารเสริมแรงเหล่านั้นจะทำให้สมบัติในการยึดตัวของพอลิเมอร์ลดลงอย่างมาก จึงควรผสมวัสดุประเภทสารเสริมสารแรงเพียงเล็กน้อยเพื่อคงความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์ไว้ สอดคล้องกับ งานวิจัยที่มีการเติมวัสดุที่มีความแข็งกว่าพอลิเมอร์ลงในพอลิเมอร์ เช่น สุภาภรณ์ ทุมสอน [11] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, สมนึก สังข์หนู และเจษฎา วงษ์อ่อน [10] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, Mihai Rusu Et al [19] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และ A.S. Luyt Et al [20] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาพบว่าเมื่อมีการผสมวัสดุที่มีความแข็งในพอลิเมอร์ความสามารถในการยึดตัวจะลดลง โดยสัดส่วนที่มีความสามารถในการยึดตัวมากที่สุดคือสัดส่วนที่มีการผสมวัสดุลงในพอลิเมอร์น้อยที่สุด

จากการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดโดยใช้เครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ซีตตระกรันอะลูมิเนียมส่งผลให้พอลิพรอพิลีนมีสีเข้มขึ้นเป็นสีเทาคล้ายกับสีของซีตตระกรันอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.4 ลักษณะสีพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสีเข้มขึ้นเมื่อปริมาณซีตตระกรันอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณการผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียม 3, 5, 7, และ 9% พอลิเมอร์ผสมนี้มีสีเข้มมากคล้ายกัน แต่เมื่อมองผ่านแสง พอลิเมอร์ผสมที่ซีตตระกรันอะลูมิเนียม 9% มีความโปร่งแสงน้อยที่สุดตามด้วยพอลิเมอร์ผสมที่ซีตตระกรันอะลูมิเนียม 7, 5, และ 3 %



รูปที่ 4.4 ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณการผสมที่สัดส่วนต่างๆ

จากการผสมในเครื่องผสมภายใน พอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมถูกหมุนวนอยู่ตลอดเวลาด้วยใบกวนทั้งสองใบของเครื่อง และอนุภาคของซีตตระกรันอะลูมิเนียมมีขนาดเล็ก อนุภาคของซีตตระกรันอะลูมิเนียมจึงมีการกระจายตัวไปทั่วในเนื้อของพอลิพรอพิลีนดี ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสีสม่ำเสมอและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

4.2.2 อิทธิพลของซีตตระกรันอะลูมิเนียมต่อสมบัติความร้อน

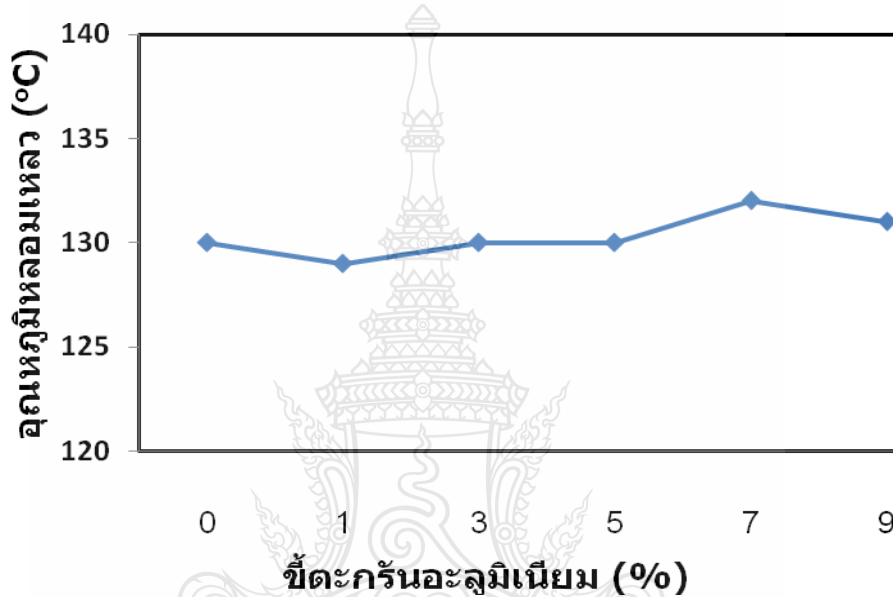
ก. อุณหภูมิหลอมเหลว

จากการทดสอบสมบัติทางด้านความร้อนของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสารตัวเติมซีตตระกรันอะลูมิเนียมจากเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ในช่วงระหว่าง $129 - 132^{\circ}\text{C}$ โดยซีตตระกรันอะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวนี้ ซีตตระกรันอะลูมิเนียมจึงไม่เกิดการหลอมเหลว มีเพียงแค่พอลิพรอพิลีนเท่านั้นที่เกิดการหลอมเหลว ผลการทดลองที่ได้นี้มีผลการทดลองคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุ่มสอน [11] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, สมนึก สังข์หนู [10] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และ Mihai Rusu Et.al [19] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวที่เกิดขึ้นเป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์เท่านั้น

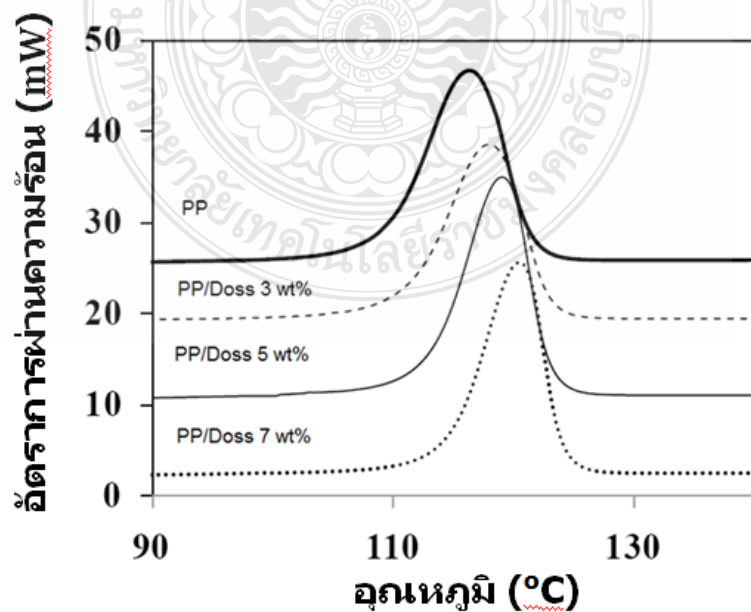
ข. เกิดผลึกของพอลิเมอร์

ในการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) จากเทคนิค DSC พบว่า T_c ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตตระกรันอะลูมิเนียม มีค่าสูงกว่า T_c ของพอลิพรอพิลีน ดังรูปที่ 4.6 ขณะที่อัตราการเกิดผลึกสูงขึ้นแต่ไม่ต่างกันมากนัก โดยที่พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียมจะมีการเกิดผลึกมากที่สุดคือ 36% ส่วนพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียมจะมีการเกิดผลึกอยู่ที่ 29.1% (ตารางที่ ข-3 ในภาคผนวก ข.) ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้แสดงว่าซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดผลึกได้ดีกว่า และจากค่า T_c ที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับซี

ตระแกรนอะลูมิเนียมบด ช่วยส่งผลในการลดเวลาในกระบวนการผลิตได้ เช่น กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด ผลการทดลองที่ได้นี้มีผลการทดลองคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [11] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าสารตัวเติมไม่มีผลต่อการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แต่สารตัวเติมส่งผลทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกิดผลึกเพิ่มขึ้น และคล้ายกับงานวิจัยของ สมนึก สังข์หนู [10] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์สูงขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมฟอยล์ ทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกิดผลึกได้มากขึ้น ส่งผลให้มีความเป็นผลึกเพิ่ม



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตระแกรนอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตระแกรนอะลูมิเนียมสัดส่วนต่างๆ

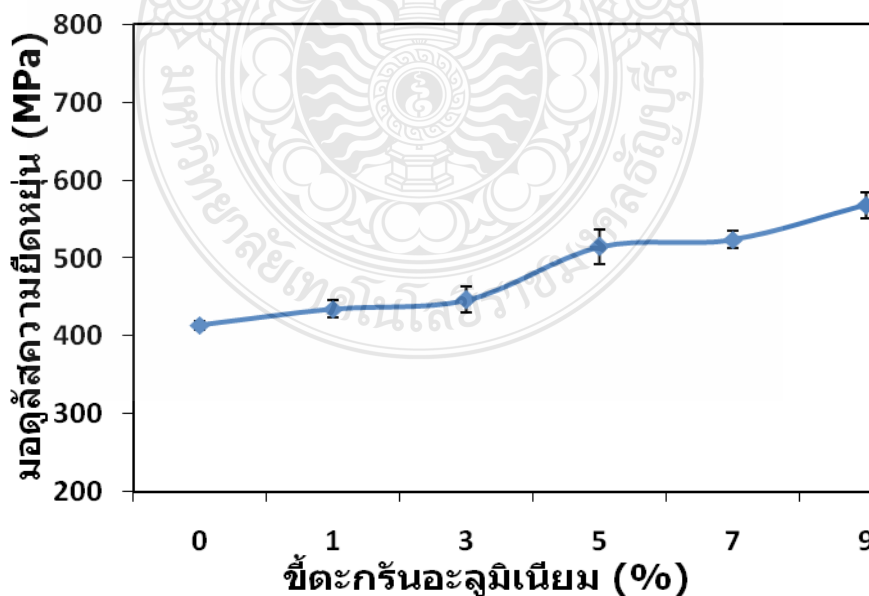
4.3 อิทธิพลของปริมาณซีตะกัระนอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกล

4.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

ในการทดสอบแรงดึงทดสอบโดยนำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ของบริษัท Monsanto / T2000 ซึ่งมีวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงต่อไปนี้

ก. มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

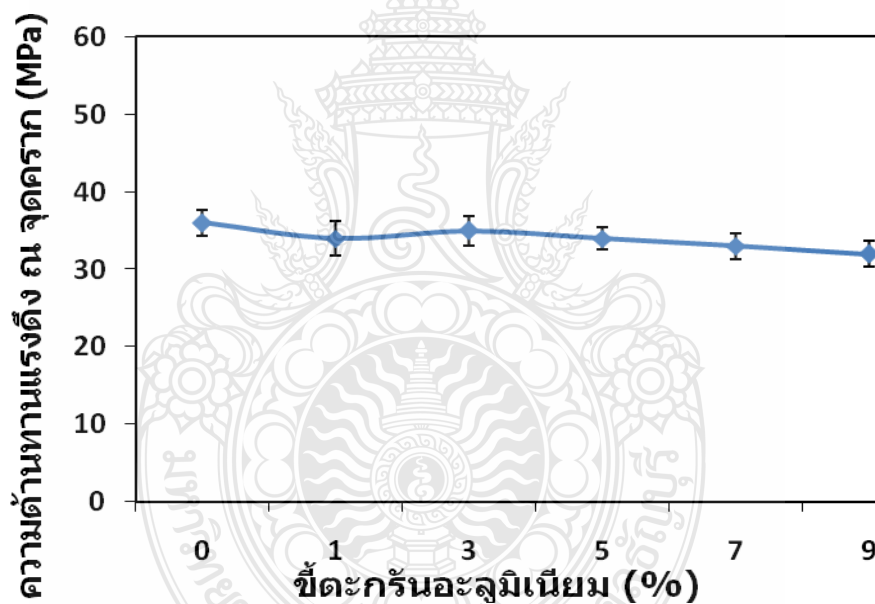
ที่ปริมาณการผสมสารตัวเติม 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 wt% พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซีตะกัระนอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมมีค่ามอดูลัสที่มากกว่าพอลิพรอพิลีน จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสารตัวเติมเพิ่มขึ้นโดยพอลิพรอพิลีนที่ปริมาณการผสมซีตะกัระนอะลูมิเนียม 1 และ 3 wt% ค่ามอดูลัสสูงขึ้นกว่า พอลิพรอพิลีน ที่ไม่ได้ผสมซีตะกัระนอะลูมิเนียมเพียงเล็กน้อย แต่ที่ปริมาณการผสมซีตะกัระนอะลูมิเนียม 5, 7, และ 9 wt% ค่ามอดูลัสสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.7 โดยค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่มีค่าสูงสุด อยู่ที่พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัระนอะลูมิเนียม 9 wt% มีค่าเท่ากับ 568 Mpa สูงกว่าค่าพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตะกัระนอะลูมิเนียมถึง 154 Mpa จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [11] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณการผสมเปลือกหอยแครงบดที่สูงขึ้น, Mihai Rusu Et.al [19] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณการผสมผงสังกะสีที่สูงขึ้น และ A.S. Luyt Et.al [20] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณการผสมผงทองแดงที่สูงขึ้น แต่ขัดแย้งกับ สมนึก สังข์หนู [10] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงลดลงเมื่อผสมกับอะลูมิเนียมฟอยล์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอะลูมิเนียมฟอยล์มีความไม่เข้ากัน ส่งผลให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง



รูปที่ 4.7 มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกัระนอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

ข. ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)

พอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียมบด ที่ปริมาณการผสมสารตัวเติม 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 wt% พบว่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีน พบว่ามีแนวโน้มคงที่ ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก สัมพันธ์กับการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลัก (Matrix) โดยที่โครงสร้างหลักของพอลิเมอร์ผสมคือพอลิพรอพิลีน ดังนั้นค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงมีค่าไม่ต่างจากค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีน โดยค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ของพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียมจะมีค่าสูงสุดคือ 36.06 Mpa ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 9 wt% ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากต่ำสุด อยู่เพียง 3.94 Mpa ดังแสดงในรูป 4.8 จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [11] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, Mihai Rusu Et.al [19] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และ A.S. Luyt Et.al [20] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลง

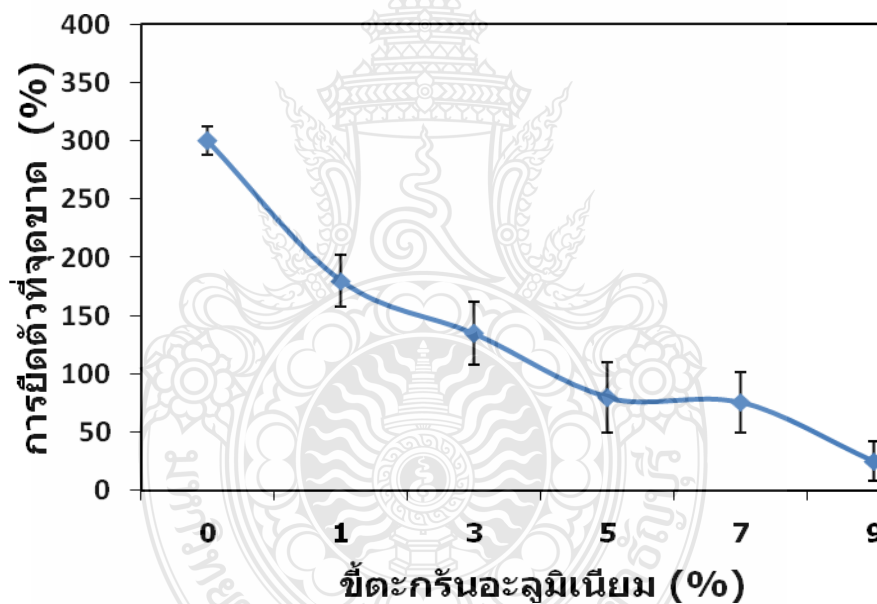


รูปที่ 4.8 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

ค. เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

จากการทดสอบการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีน พบว่าเมื่อปริมาณซีตะกรันอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนลดลง เนื่องจากการนำสารตัวเติมที่แข็งมาผสมกับพอลิเมอร์ โดยที่สารตัวเติมเป็นจุดรวมของความเครียด (Stress Concentrator) เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีจุดรวมของความเครียดมากขึ้น ทำให้พอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสารตัวเติมมีความสามารถในการยืดตัวลดลง และสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสความยืดหยุ่นโดยที่ มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลงโดยพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซี

ตะแกรงอะลูมิเนียมจะมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดสูงสุดคือ 299.88% เมื่อผสมซีตะแกรงอะลูมิเนียมลงไป 1 wt% จะมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 180.42 wt% เมื่อผสมซีตะแกรงอะลูมิเนียมลงไป 3 wt% จะมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 135.34 wt% ซีตะแกรงอะลูมิเนียมลงไป 5 wt% จะมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 80.05 wt% เมื่อผสมซีตะแกรงอะลูมิเนียมลงไป 7 wt% จะมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 76.66 wt% และเมื่อผสมซีตะแกรงอะลูมิเนียมลงไป 9 wt% จะมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือเพียง 25.61 wt% เท่านั้น ดังแสดงในรูป 4.9 จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [11] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมเปลือกหอยแครงบดที่สูงขึ้น, สมนึก สังข์หนู [10] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมพอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมเปลือกหอยแครงบดที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับ Mihai Rusu Et.al [19] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมผงสังกะสีที่สูงขึ้น และ A.S. Luyt Et.al [20] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมผงทองแดงที่สูงขึ้น

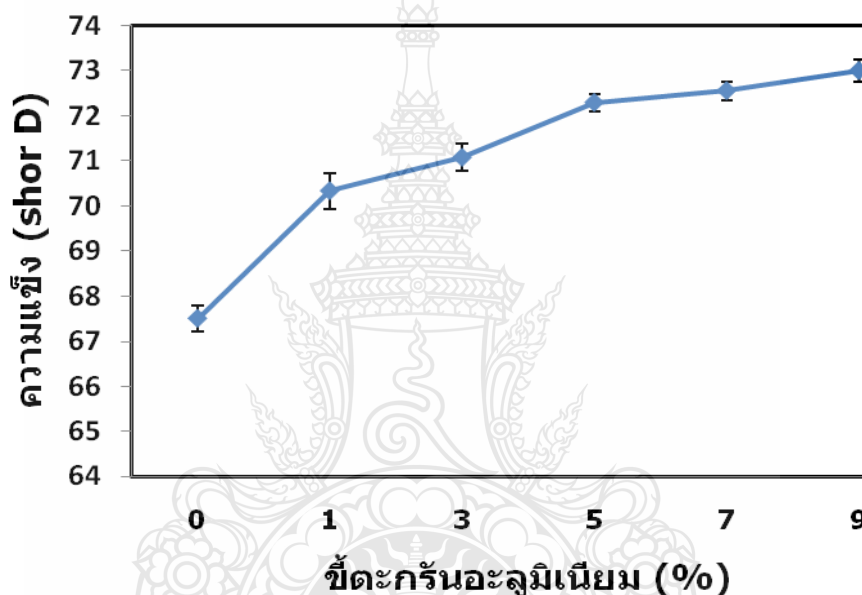


รูปที่ 4.9 การยึดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะแกรงอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

4.3.2 การทดสอบความแข็ง

ในการทดสอบความแข็งของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะแกรงอะลูมิเนียมพบว่าความแข็งของพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากซีตะแกรงอะลูมิเนียมมีความแข็งมากกว่าพอลิพรอพิลีน เมื่อผสมลงพอลิพรอพิลีนจึงทำให้เพิ่มจุดความแข็งตามซีตะแกรงอะลูมิเนียมที่กระจายตัวอยู่ในพอลิพรอพิลีน ดังนั้นจึงทำให้พอลิพรอพิลีนมีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะแกรงอะลูมิเนียม 9 % wt มีค่าความแข็งสูงสุดคือ 73.02 Shore D ซึ่งมีค่าความแข็งสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตะแกรงอะลูมิเนียมซึ่งมีค่าความแข็งต่ำที่สุดคือ 67.50 Shore D อยู่ 5.52 Shore D แต่มีค่า

ความแข็งสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5 และ 7% wt เพียงเล็กน้อย คือสูงกว่า 0.73 และ 0.46 Shore D ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.10 จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [11] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, ผ.ศ.ดร. สมนึก สังข์หนู [10] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, János Móczó [21] ที่มีการเติมเส้นใยจากธรรมชาติลงในพอลิพรอพิลีน, Mihai Rusu Et.al [19] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, A.S. Luyt Et.al [20] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น และ M.H. Choa Et.al [22] ที่มีการผสม MoS_2 , Al_2O_3 และ ชาติอื่นๆ ลงในเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ จากงานวิจัยที่กล่าวมา พบว่าการผสมวัสดุที่มีความแข็งกว่าพอลิเมอร์ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความแข็งขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้

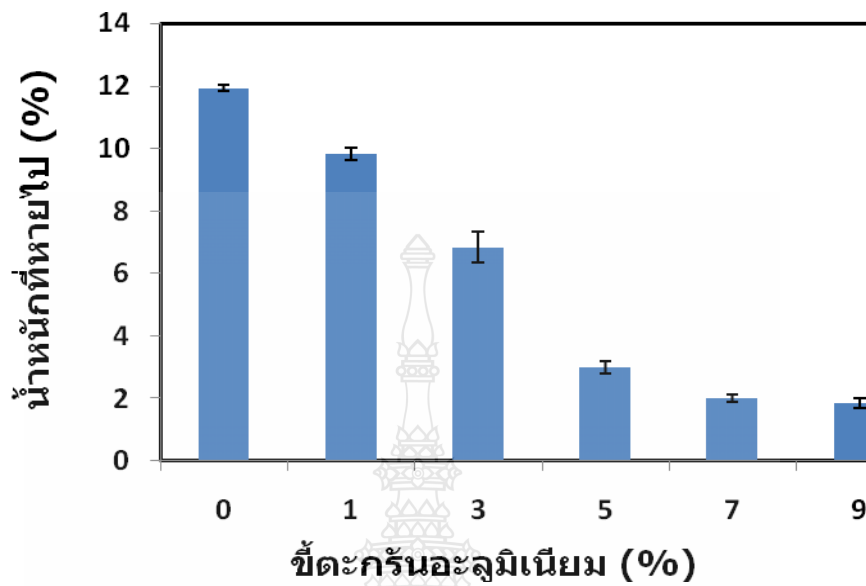


รูปที่ 4.10 ความแข็งของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

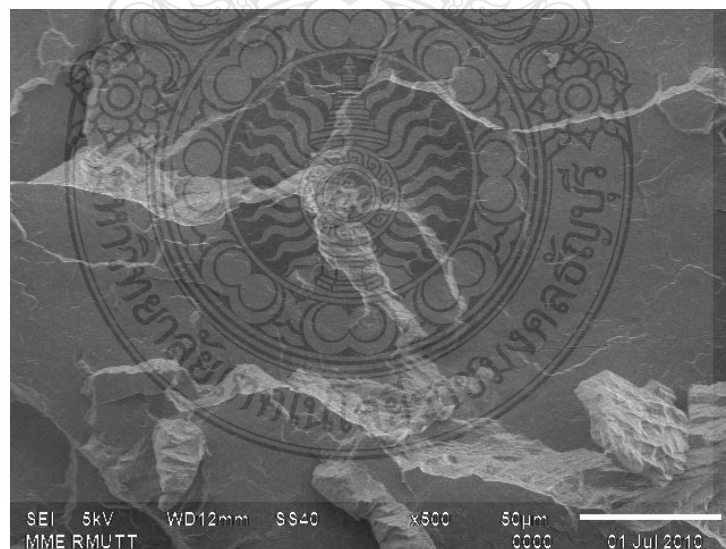
4.3.3 การทดสอบความเสียดทาน

จากผลการทดลองพบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ ซีตะกรันอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุผสมมีส่วนของซีตะกรันอะลูมิเนียมซึ่งมีความแข็งและทนการเสียดทานมากกว่า พอลิพรอพิลีน ทำให้วัสดุผสมที่ได้มีความสามารถทนทานต่อการขัดสี มากกว่า พอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม โดยจากกราฟที่ 4.10 เห็นได้ว่าการลดลงของน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนลดลงถึง 12 % ในขณะที่เมื่อเติมซีตะกรันอะลูมิเนียมลงไปเล็กน้อยค่าการลดลงของน้ำหนักลดลงเหลือ 10% และลดลงต่ำสุดที่สัดส่วน 9% ค่าการลดลงของน้ำหนักเหลือ 2% ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ Yiqun Liu Et.al [23] ที่ผสมผงยาง SBR และ NBR ขนาดนาโนลงในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ พบว่าผงยางขนาดนาโนที่ผสมลงในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ส่งผลให้พอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ สามารถต้านการเสียดทานได้มากขึ้น, M.H. Cho and S. Bahadur [22] ที่ผสมคอปเปอร์ออกไซด์ขนาดนาโนลงในพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ พบว่าพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ สามารถทน

การเสียหายได้มากขึ้นเมื่อผสมคอปเปอร์ออกไซด์ขนาดนาโนลงไป และ M.H. Cho Et.al [24] ที่ผสม MoS_2 , Al_2O_3 และธาตุอื่นๆ ลงในเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ พบว่า MoS_2 และ Al_2O_3 ที่ผสมลงเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ส่งผลให้สามารถทนการเสียหายได้มากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.11 น้ำหนักที่ลดลงจากการทดสอบความเสียหายของพอลิพรอพิลีนที่ปริมาณการผสมซีตากรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

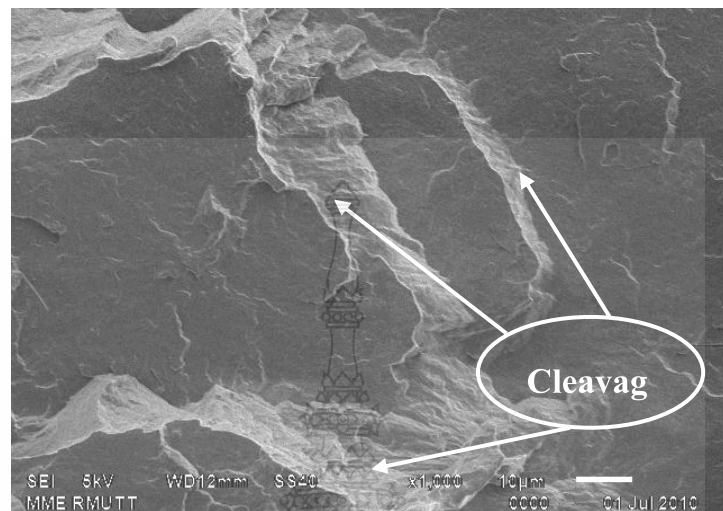


รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีน 100% (X500)

4.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตากรันอะลูมิเนียม

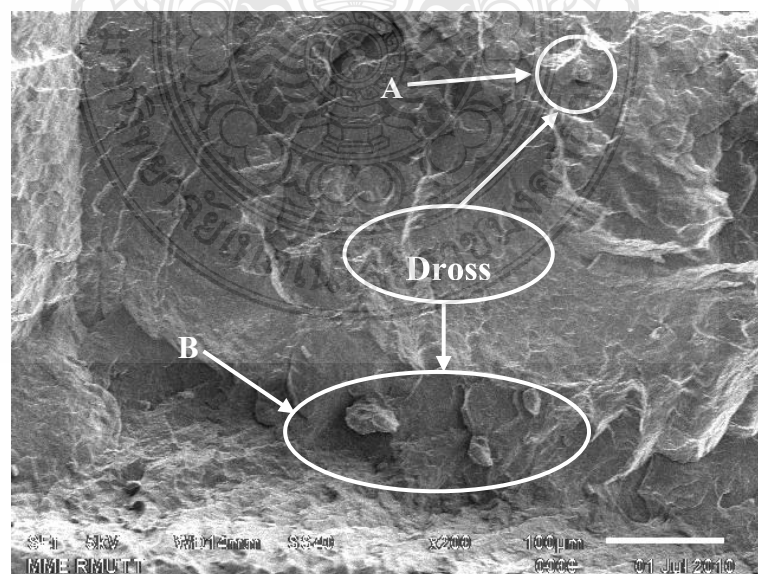
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าอนุภาคของซีตากรันอะลูมิเนียมมีการกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนมากขึ้นตามปริมาณของการเติมซีตากรันอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น จากการที่อนุภาคซีตากรันอะลูมิเนียมกระจาย

แทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีน ทำให้พอลิพรอพิลีนมีความเป็นเนื้อเตี้ยวลดลง ส่งผลให้มีค่าการยึดตัวที่จุดขาดลดลง แต่อนุภาคของซีตอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงและสามารถทนการเสียดสีมากกว่าพอลิพรอพิลีน จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งแรงและทนการเสียดทานเพิ่มขึ้น กว่าพอลิพรอพิลีนปกติ



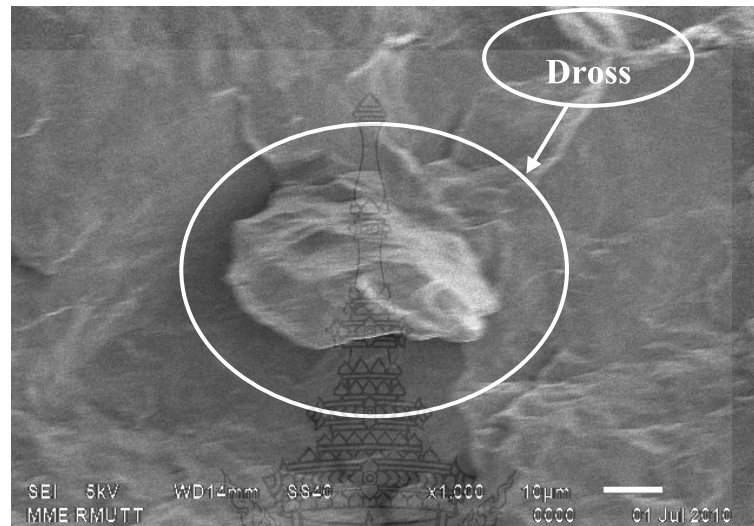
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของพอลิพรอพิลีน 100% (X1,000)

รูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 เป็นโครงสร้างจุลภาคของพอลิพรอพิลีน 100% ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1,000 เท่า จากรูปเห็นได้ว่าเป็นรอยหักแบบเปราะ (Cleavage) มีลักษณะเป็นรอยแตกแบบคลื่น เนื่องจากการนำชิ้นงานไปหักไนโตรเจนเหลวแล้วนำมาส่องกล้อง จากรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 พบว่าในเนื้อของพอลิพรอพิลีนนี้ไม่มีอนุภาคของซีตอะลูมิเนียมแทรกตัวอยู่



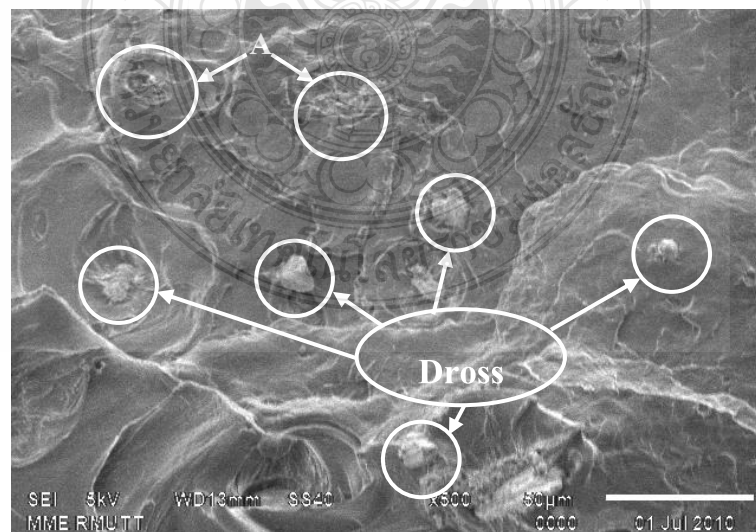
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตอะลูมิเนียม 1 wt% (X200)

รูปที่ 4.14 เป็นโครงสร้างจุลภาคของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า จากรูปเห็นว่ามีอนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีน แต่อนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการผสมซีตะกรันอะลูมิเนียมในปริมาณที่น้อย โดยมีอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม 1 อนุภาค กระจายตัวอยู่ด้านบนของรูป 4.13 (แสดงในลูกศร A) และมีอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม 3 อนุภาค เกาะกลุ่มกันอยู่ที่ด้านล่างของรูป 4.13(แสดงในลูกศร B)



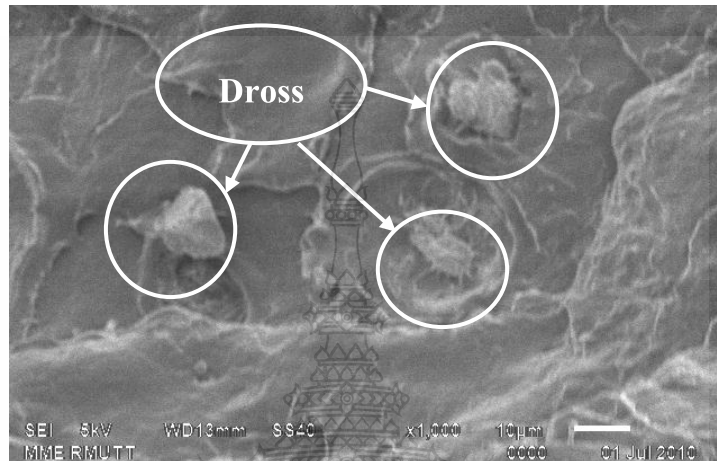
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1 wt% (X1,000)

รูปที่ 4.15 เป็นโครงสร้างจุลภาคของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงให้เห็นอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมที่อยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนอย่างชัดเจน

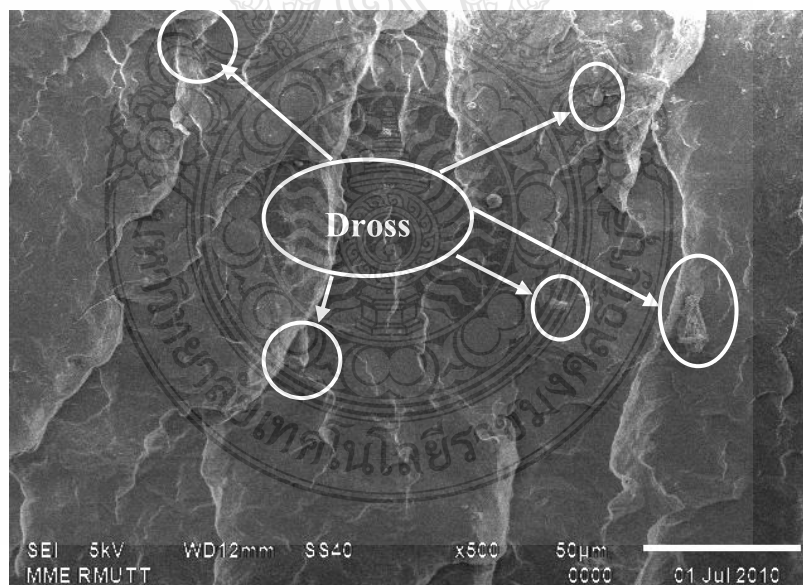


รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 3 wt% (X500)

รูปที่ 4.16 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 3% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 500 เท่า จากรูปอนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนเพิ่มมากขึ้นกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมในเนื้อของพอลิพรอพิลีนสม่ำเสมอกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1% จากรูปที่ 4.14 มีอนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมหลุดออกไปจากเนื้อของพอลิพรอพิลีน (แสดงในลูกศร A) เนื่องจากขั้นตอนการนำพอลิเมอร์ผสมนี้ไปหักในไนโตรเจนเหลว



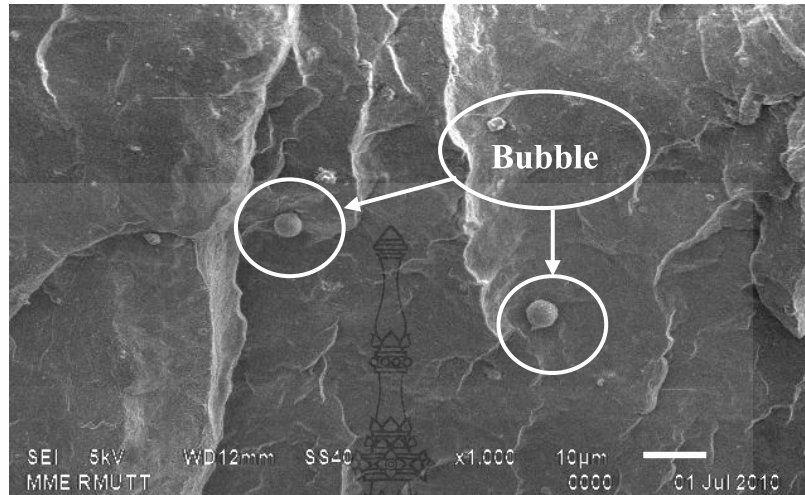
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 3 wt% (X1,000)



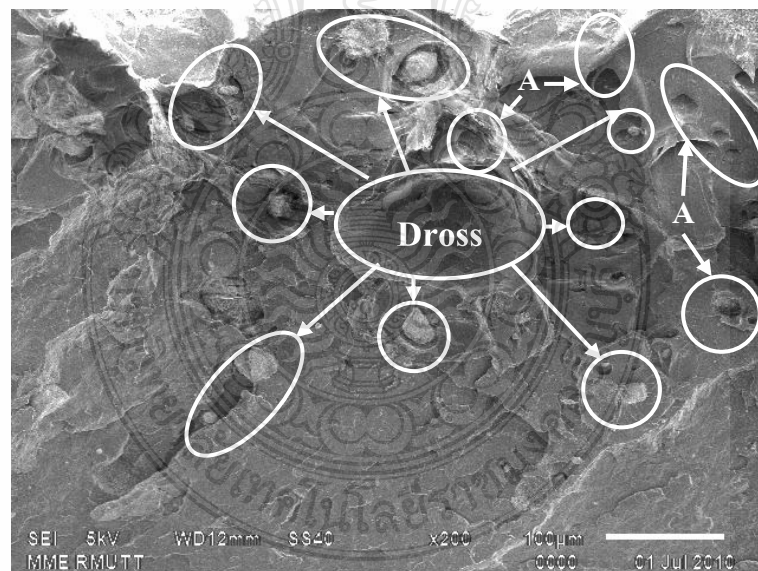
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5 wt% (X500)

รูปที่ 4.17 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 3% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จากรูปพบว่าอนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมทั้ง 3 อนุภาคไม่เกาะตัวกันเป็นกลุ่ม โดยในแต่ละอนุภาคจะมีระยะห่างระหว่างกัน

รูปที่ 4.18 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 500 เท่า อนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนค่อนข้างสม่ำเสมอ

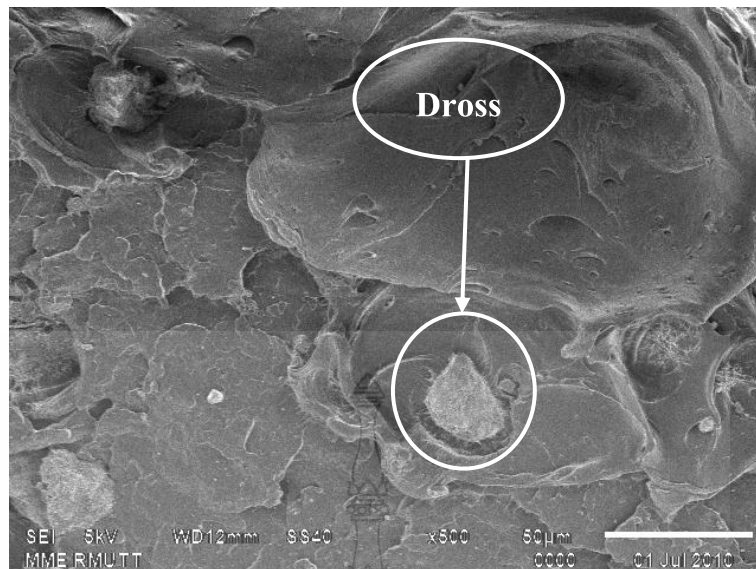


รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5 wt% (X1000)

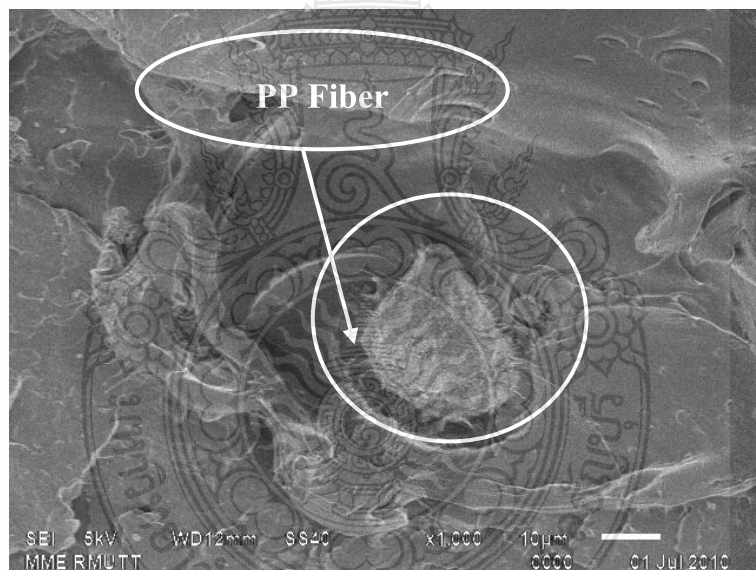


รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7 wt% (X200)

รูปที่ 4.19 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จากรูปพบว่า มีฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนด้วย โดยสังเกตได้จากฟองอากาศนั้นจะมีลักษณะกลมมดมาก และโปร่งแสง โดยสาเหตุการเกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนอาจเกิดจากขั้นตอนการขึ้นรูปและการหล่อเย็น



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7 wt% (X500)



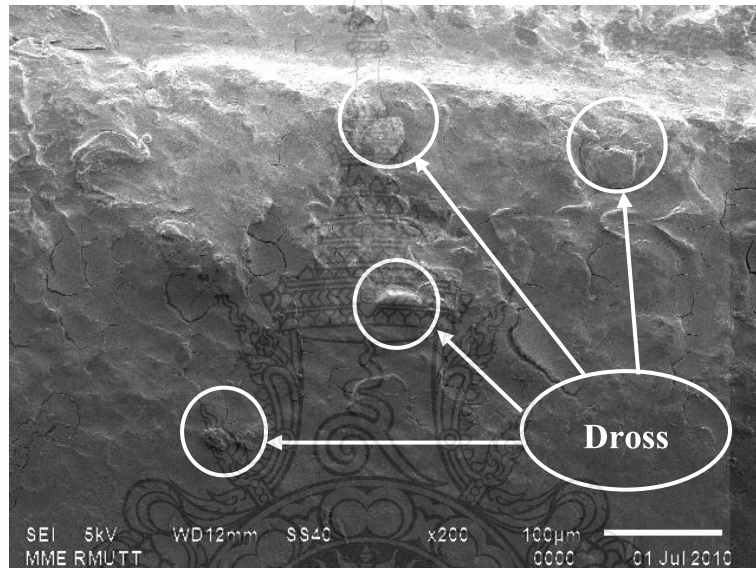
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7 wt% (X1000)

รูปที่ 4.20 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกาวของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมขนาดต่างๆกระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อพอลิพรอพิลีนมากอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงรอยของอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมที่หลุดออกไปจากเนื้อพอลิพรอพิลีน (แสดงในลูกศร A) เนื่องจากขั้นตอนการนำพอลิเมอร์ผสมนี้ไปหักในไนโตรเจนเหลว และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 เท่าไปที่อนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7%

รูป 4.21 ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7% โดยน้ำหนัก

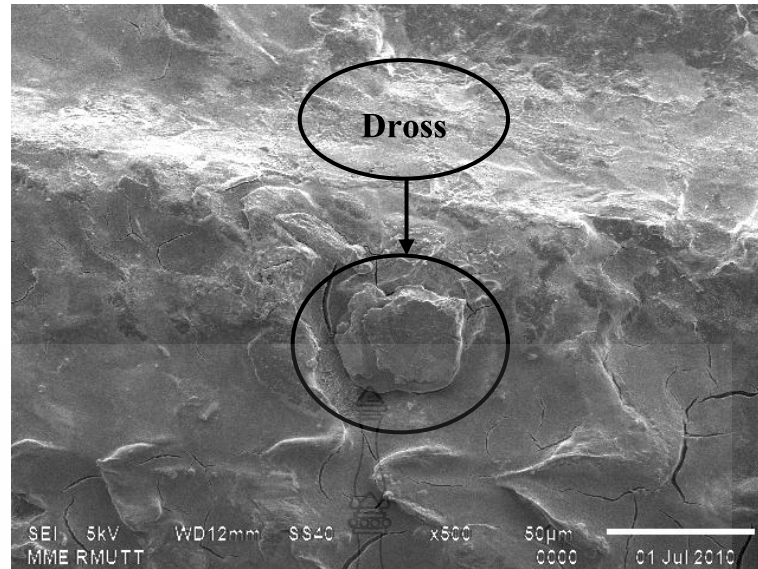
พบว่า มีบางสิ่งยื่นออกมารอบๆอนุภาคซีตะแกรนอะลูมิเนียม และในรูปที่ 4.22 เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะแกรนอะลูมิเนียม 7% โดยน้ำหนัก พบว่าที่อนุภาคของซีตะแกรนอะลูมิเนียมมีเส้นใยของพอลิพรอพิลีนเกาะอยู่รอบๆ แสดงว่าระหว่างอนุภาคของซีตะแกรนอะลูมิเนียมและพอลิพรอพิลีน มีความเข้ากันส่งผลให้เกิดการยึดเกาะระหว่างพอลิพรอพิลีนและซีตะแกรนอะลูมิเนียมที่ดี

จากรูปที่ 4.23 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะแกรนอะลูมิเนียม 9% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่ารูปที่ได้ออกมามีคราบลักษณะคล้ายโคลนปกคลุมอยู่บนผิวชิ้นงาน เนื่องจากการนำชิ้นงานไปจุ่มไนโตรเจนเหลวนานเกินไป ไนโตรเจนเหลวจึงปกคลุมอยู่บนผิวชิ้นงานเป็นลักษณะคล้ายโคลน จึงเห็นอนุภาคของซีตะแกรนถูกปกคลุมอยู่ ส่วนซีตะแกรนอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กถูกปกคลุมจนมองไม่เห็น

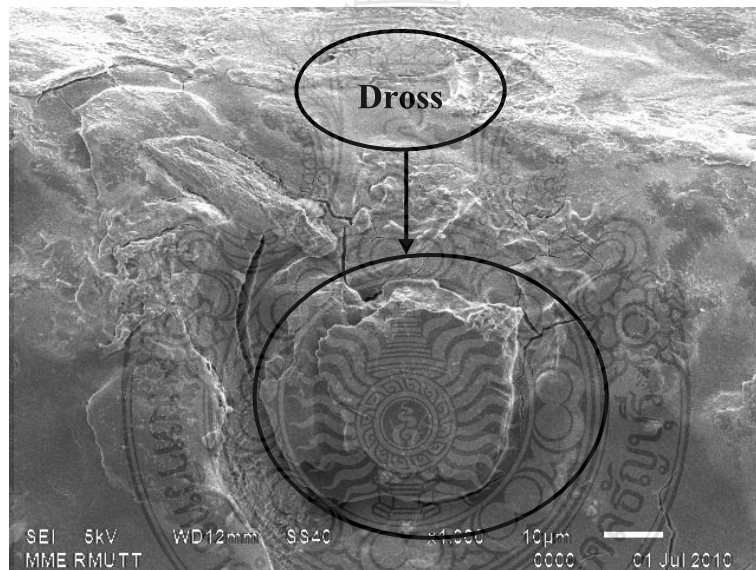


รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะแกรนอะลูมิเนียม 9 wt% (X200)

ในรูปที่ 4.24 ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ได้ออกมามีคราบลักษณะคล้ายโคลนปกคลุมอยู่บนผิวชิ้นงานเหมือนกับรูปที่ 4.23 และในรูปที่ 4.25 เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 เท่าไปที่อนุภาคซีตะแกรนอะลูมิเนียม ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะแกรนอะลูมิเนียม 9% พบว่ารอบๆของซีตะแกรนอะลูมิเนียมไม่มีเส้นใยของพอลิพรอพิลีนเกาะอยู่ ส่งผลให้การเกาะตัวกันระหว่างพอลิพรอพิลีนกับอนุภาคซีตะแกรนอะลูมิเนียมไม่ดี ทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวของพอลิพรอพิลีนลดลง ส่งผลให้มีความสามารถในการยึดตัวได้น้อย



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 9 wt% (X500)



รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 9 wt% (X1000)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตะกัณอะลูมิเนียมสามารถนำ ซีตะกัณอะลูมิเนียมที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมการหล่อ มาเป็นสารตัวเติม (Filler) ในการทำพอลิเมอร์ผสมได้

5.1.1 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมทางกายภาพและทางกล

ก. ซีตะกัณอะลูมิเนียมที่ใช้ทดลอง มีส่วนประกอบทางเคมีเกือบทั้งหมดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ $49 \mu\text{m}$

ข. วัสดุผสมที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของซีตะกัณอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น

ค. ซีตะกัณอะลูมิเนียมสามารถนำมาผสมกับพอลิพรอพิลีนได้ แต่อนุภาคของซีตะกัณอะลูมิเนียมที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีน ทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิพรอพิลีนลดลง ส่งผลให้วัสดุผสมที่ได้มีความสามารถในการยึดตัวลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียมมีค่าสูงสุดคือ 299.88% สำหรับพอลิพรอพิลีนที่มีการผสมซีตะกัณอะลูมิเนียมลงไปนั้น พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 1% wt มีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดดีที่สุดคือ 180.42%

ง. เนื่องจากอนุภาคของซีตะกัณอะลูมิเนียมมีความแข็งและทนการเสียดสีได้มากกว่าพอลิพรอพิลีน จึงส่งผลให้วัสดุผสมที่ได้มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ค่าความแข็งและทนการเสียดทานเพิ่มขึ้นโดยพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 9% wt มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ค่าความแข็ง และมีน้ำหนักที่สูญเสียไปในการทดสอบความเสียดทาน ดีที่สุด คือ 568 Mpa, 73.02 Shore D และ 1.84% ตามลำดับ

จ. เนื่องจากโครงสร้างหลักของวัสดุผสมที่ได้ ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างหลักของพอลิพรอพิลีน จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ง. พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 7% wt จะมีคุณสมบัติโดยรวมดีที่สุดคือ คือมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 524 Mpa ค่าความแข็ง 72.56 Shore D และในการทดสอบความเสียดทานมีน้ำหนักที่สูญเสียไป 2 % โดยมีสมบัติเหล่านี้คือ มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ค่าความแข็ง และมีน้ำหนักที่สูญเสียไปในการทดสอบความเสียดทาน ต่ำกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 9% wt เพียงเล็กน้อยคือ 44 Mpa, 0.46 Shore D, 0.16% ตามลำดับ แต่พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 7% wt จะมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 9% wt ถึง 55% ซึ่งจากการที่มีความสามารถในการยึดตัวสูง ส่งผลให้ พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 7% wt มีทั้งความแข็ง ความสามารถในการทนความเสียดทานสูงแล้ว และยังสามารถในการยึดตัวได้อีกด้วย

5.1.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมทางความร้อน

ก. ปริมาณซีตะกัณอะลูมิเนียมที่เติมลงไป ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผสม เนื่องจากเนื้อพอลิพรอพิลีนเท่านั้นที่เกิดการหลอมเหลว โดยอุณหภูมิหลอมเหลวจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ $129-132^{\circ}\text{C}$

ข. ความเป็นผลึก (% Crystallinity) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการผสมซีตากรันอะลูมิเนียมสูงขึ้น เนื่องจากซีตากรันอะลูมิเนียมมีความเป็นผลึกสูงกว่าพอลิพรอพิลีน ดังนั้นเมื่อผสมซีตากรันอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกมากขึ้น จากผลการทดลองนี้ได้แสดงว่าซีตากรันอะลูมิเนียมส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดผลึกได้ดีขึ้น โดยพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตากรันอะลูมิเนียม 9% wt จะมีความเป็นผลึกสูงสุด คือ 36% และมีอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ 122 °C

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาผสมซีตากรันอะลูมิเนียมกับพอลิเมอร์ประเภทอื่นเช่น PVC และ PE เพื่อใช้ในการลดต้นทุน ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้ เช่น กันชนรถยนต์ ท่อน้ำทิ้ง ท่อสายไฟ เป็นต้น

5.2.2 ควรใช้สารปรับแต่งผิวซีตากรันอะลูมิเนียม หรือใช้สารเติมแต่งที่เรียกว่าสารประสาน (Coupling agent) ซึ่งจะช่วยให้แรงยึดระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตากรันอะลูมิเนียม ลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุผสม ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการยึดตัวเพิ่มขึ้น



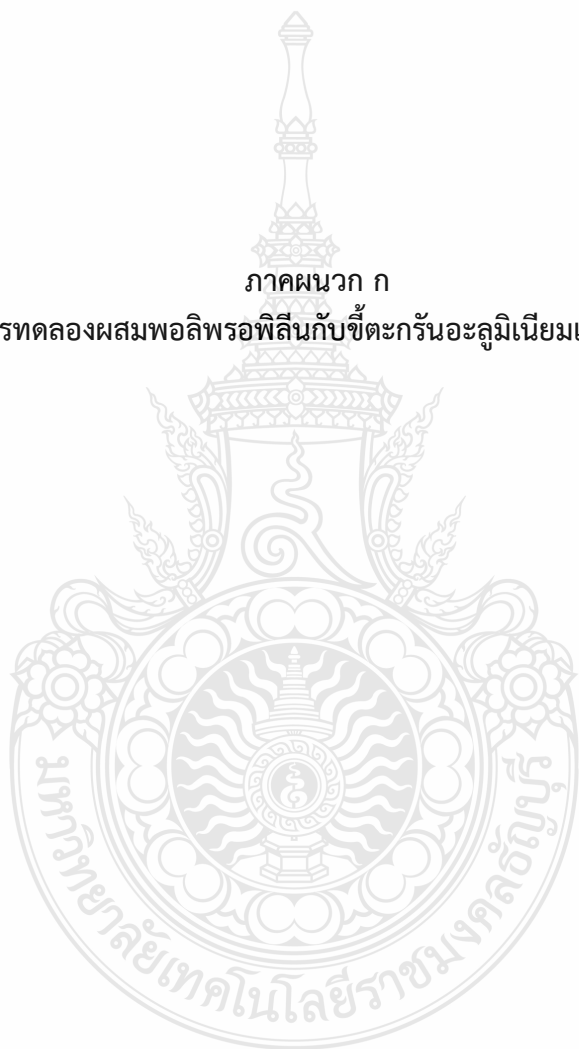
เอกสารอ้างอิง

- [1] D.A. Askeland and P.P. Phule. 2006. The Science and Engineering of Materials. Singapore, Thomson Learning.
- [2] Z. Zhang and K. Friedrich. 2003. Artificial neural networks applied to polymer composites: a review. Composites Science and Technology 63: 2029-2044.
- [3] ASM International. 2000. "ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials" ASM International, USA, CD-ROM.
- [4] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2527. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์
- [5] อรุษา สรวารี, สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] เชาวลิต ลิ้มฉวีจิตร. 2549 "ความสะอาดของอะลูมิเนียม หลอมเหลวสำหรับการหล่อโลหะ" ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] สมาคมไทยคอมโพสิต, คอมโพสิต, สำนักพิมพ์ไอ.เอส. พรินต์ติ้งเฮาส์ จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2548.
- [8] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ 1, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] อารี ชาญบุญสมบัติ ภัทรารวรรณ คหะวงศ์ และศุภมาส ต่านวิทยากุล, "เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค" ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- [10] สมนึก สังข์หนู, เจษฎา วงษ์อ่อน. 2551. "การศึกษาเส้นใยผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับอลูมิเนียมพอยล์นำกลับมาใช้ใหม่". มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [11] สุภาภรณ์ ทุมสอน, ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และ สมบัติของพอลิเอทิลีนที่ผสมกับเปลือกหอยแครง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- [12] Yiqun Liu, Zhongqing Fan. 2006 "Application of nano powdered rubber in friction materials" SINOPEC Beijing Research Instit. of Chem. Ind. Plastic Process. Center.
- [13] Mihai Rusu, Nicoleta Sofian a, Daniela Rusu b, 2000 "Mechanical and thermal properties of zinc powder filled high density polyethylene composites" Technical University, Faculty of Industrial Chemistry, Romania.
- [14] A.S. Luyt, J.A. Molefi, H. Krump, 2005 "Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites" Department of Chemistry, University of the Free State, South Africa.
- [15] M.H. Cho, S. Bahadur , 2004 "Study of the tribological synergistic effects in nano CuO-filled and fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites" Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, USA.

- [16] ใบรายการแสดงสมบัติของพอลิพรอพิลีนเกรด PP เกรด H255JA, บริษัทเครือซีเมนต์ไทย.
- [17] Mihai Rusu a, Nicoleta Sofian a, Daniela Rusu b, 2000 **“Mechanical and thermal properties of zinc powder filled high density polyethylene composites”** Technical University, Faculty of Industrial Chemistry, Romania.
- [18] American National Standard, 1996, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,” **Annual Book of ASTM Standard**, ASTM D 638-96, Vol.08.02, New York.
- [19] Mihai Rusu a, Nicoleta Sofian a, Daniela Rusu b, 2000 **“Mechanical and thermal properties of zinc powder filled high density polyethylene composites”** Technical University, Faculty of Industrial Chemistry, Romania.
- [20] A.S. Luyt, J.A. Molefi, H. Krump, 2005 **“Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites”** Department of Chemistry, University of the Free State, South Africa.
- [21] János Móczó, Béla Pukánszky. 2009 **“Deformation and failure of PP composites reinforced with lignocellulosic fibers: Effect of inherent strength of the particles”** Laboratory of Plastics and Rubber
- [22] M.H. Choa, S. Bahadura and A.K. Pogolianb, 2005 **“Friction and wear studies using Taguchi method on polyphenylene sulfide filled with a complex mixture of MoS₂, Al₂O₃, and other compounds”** Department of Mechanical Engineering, Iowa State University USA.
- [23] Yiqun Liu, Zhongqing Fan. 2006 **“Application of nano powdered rubber in friction materials”** SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry Plastic Processing Center. China.
- [24] M.H. Cho, S. Bahadur , 2004 **“Study of the tribological synergistic effects in nano CuO-filled and fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites”** Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, USA.

ภาคผนวก ก

การทดลองผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตากรันอะลูมิเนียมเบื้องต้น



การทดลองผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตะแกรนอะลูมิเนียมเบื้องต้น

1. การผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตะแกรนอะลูมิเนียมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single Screw Extruder)

การผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตะแกรนอะลูมิเนียมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว มีขั้นตอนการผสมดังนี้

1.1 นำพอลิพรอพิลีนและซีตะแกรนอะลูมิเนียมไปชั่งน้ำหนักสำหรับผสม โดยมีปริมาณการผสมดังแสดงในตาราง ก-1

1.2 นำอะลูมิเนียมออกไซด์กับพอลิพรอพิลีนไปผสมลงในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

1.3 อุณหภูมิในการผสม คือ ที่ โซน 1, โซน 2, โซน 3 และ ดาย (Die) เท่ากับ 200/210/220/230 °C ที่ความเร็วรอบสกรู 50 รอบต่อนาที (แสดงในตาราง ก-1)

1.4 ทำเส้นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านออกมาจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวให้เย็นตัว โดยปล่อยให้ตกผ่านน้ำ

1.5 นำเส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทำการตัดเป็นเม็ดโดยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก

1.6 นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปเก็บไว้ในกล่องพลาสติก



รูปที่ ก.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว



รูปที่ ก.2 การใส่วัสดุลงในเครื่องเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว



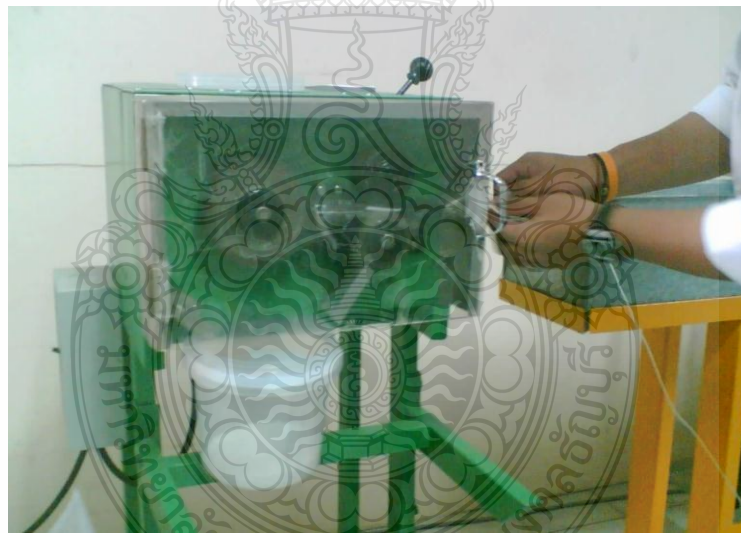
รูปที่ ก.3 อุณหภูมิและความเร็วรอบที่ใช้ในการผสม



รูปที่ ก.4 เส้นพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมมาทางดายน์



รูปที่ ก.5 เส้นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านจากเครื่อง Single Screw Extruder ถูกทำให้เย็นตัวในน้ำ



รูปที่ ก.6 การตัดเส้นพอลิเมอร์เป็นเม็ดพอลิเมอร์

2. การเลือกช่วงการผสม

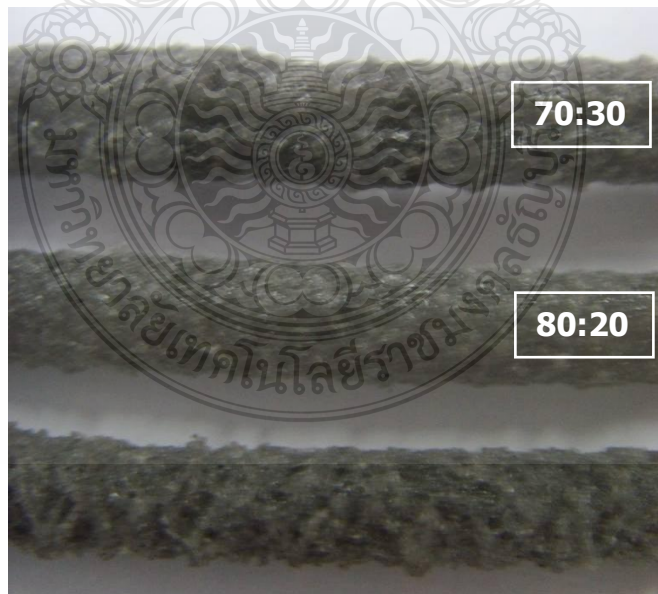
เนื่องจากยังไม่เคยมีการศึกษาวิจัยโดยการนำซีตะกัณอะลูมิเนียมผสมในพอลิเมอร์มาก่อน ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกช่วงการผสมกว้างๆ เพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลในการนำไปเลือกช่วงการผสมอย่างละเอียดอีกครั้ง โดยผู้วิจัยสุ่มเลือกการผสมซีตะกัณอะลูมิเนียมในพอลิพรอพิลีน ที่ 10, 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก และมีตัวแปรในการผสมดังแสดงในตาราง ก.1 โดยซีตะกัณอะลูมิเนียมผสมนั้นยังไม่ได้ผ่านการคัดแยกขนาด

ตารางที่ ก.1 การผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตะกั่วนอะลูมิเนียมในการเลือกช่วงการผสม

ลำดับ	พอลิเมอร์ผสม	อัตราส่วนผสม PP: dross (wt %)	อุณหภูมิ (°C) zone1/zone2/zone3/die	ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)
1	PP: dross	100: 0	200/210/220/230	50
2	PP: dross	90:10	200/210/220/230	50
3	PP: dross	80:20	200/210/220/230	50
4	PP: dross	70:30	200/210/220/230	50



รูปที่ ก.7 เส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว



รูปที่ ก.8 ผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตะกั่วนอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

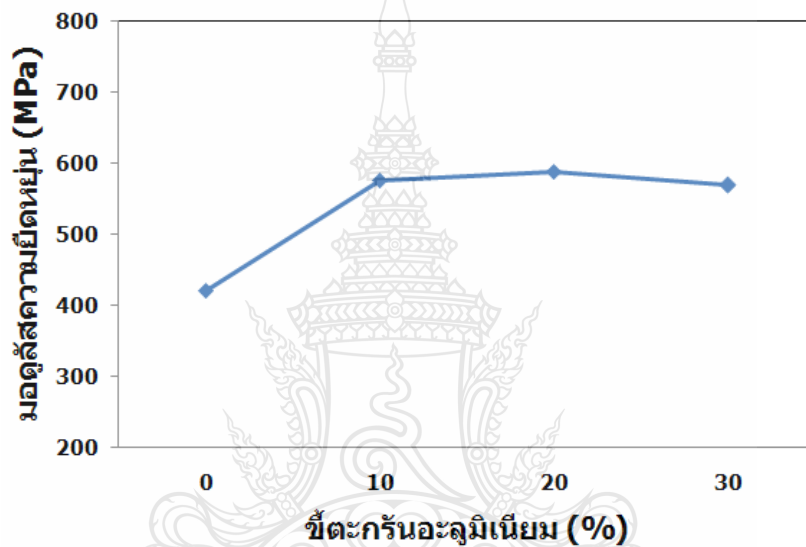
จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว พบว่าเส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสีเข้มขึ้น เป็นสีเทา มีลักษณะผิวหยาบ ขรุขระ มีหลุมฟองอากาศตามผิว เมื่อหักหรือบิดจะหักได้ง่าย ดังรูป ก.8

2.1 การทดสอบแรงดึงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตากรันอะลูมิเนียมเพื่อเลือกช่วงการผสม

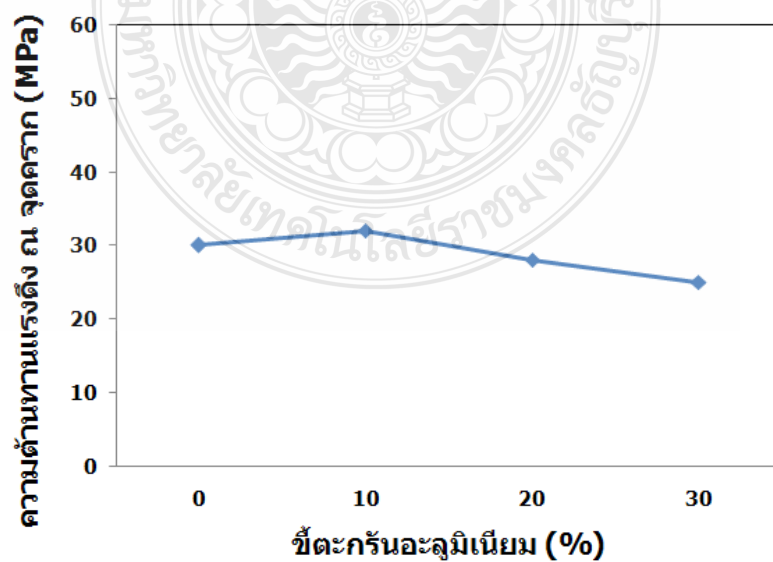
นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงของบริษัท Monsanto / T2000 มีผลการทดลองดังแสดงต่อไปนี้

ก. โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

ซีตากรันอะลูมิเนียมที่ผสมลงในพอลิพรอพิลีนส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนสูงขึ้น โดยส่วนผสมซีตากรันอะลูมิเนียม 10 และ 20 % มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน ขณะที่ส่วนผสมซีตากรันอะลูมิเนียม 30 % จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นตกลงมาเล็กน้อย



รูปที่ ก.9 โมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตากรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ



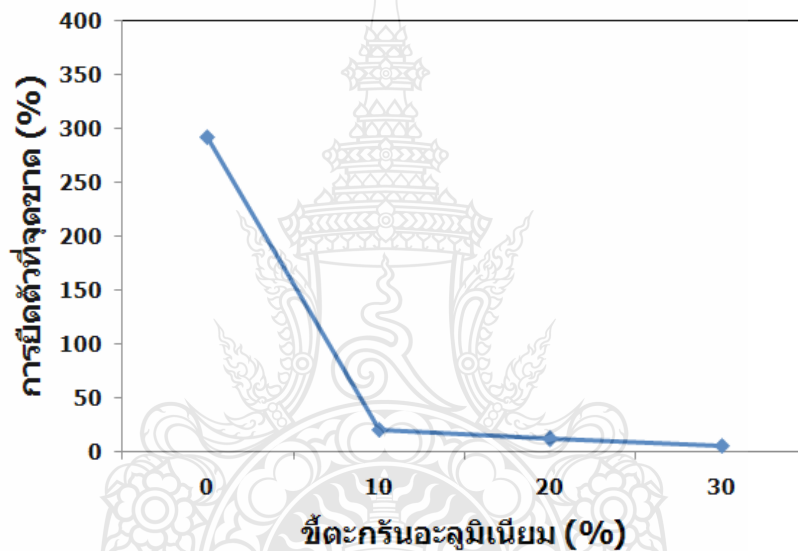
รูปที่ ก.10 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตากรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

ข. ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)

ซีตะกรันอะลูมิเนียมที่ผสมลงในพอลิพรอพิลีนไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ของพอลิเมอร์ โดยที่ ส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 10 % จะมีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก สูงขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 20 และ 30 % จะมีความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากต่ำกว่าพอลิพรอพิลีนเล็กน้อย

ค. เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

ซีตะกรันอะลูมิเนียมที่ผสมลงในพอลิพรอพิลีนส่งผลมีความสามารถในการยืดตัวลดลงอย่างมาก โดยที่ส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 10 % มีความสามารถในการยืดตัวดีกว่าที่ส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 20 และ 30 %



รูปที่ ก.11 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

2.2 สรุปผลการทดลองการเลือกช่วงการผสม

จากการทดสอบแรงดึงพบว่าช่วงที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียมไม่เกิน 10 % เนื่องจากที่การผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 10 % จะมีความสามารถในการยืดตัวและความแข็งแรง ณ จุดครากดีที่สุด ส่วนค่ามอดูลัสนั้นทุกสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน

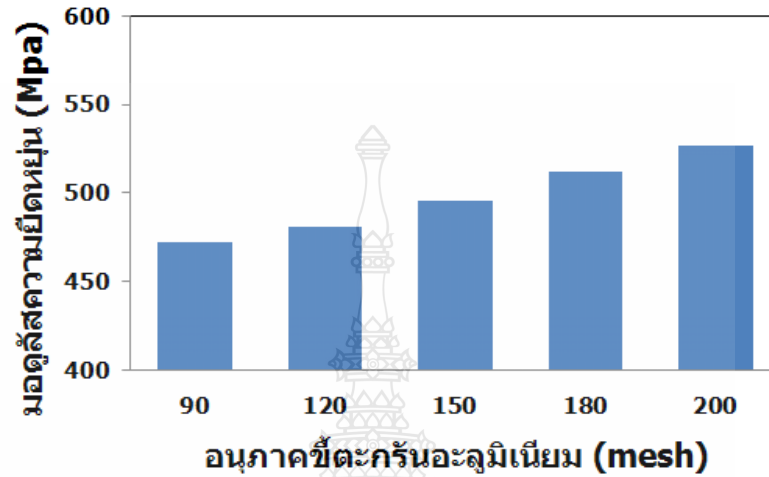
3 การเลือกขนาดอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม

จากการบดและคัดแยกขนาดซีตะกรันอะลูมิเนียม ทางผู้วิจัยสามารถคัดแยกได้หลายขนาด ประกอบไปด้วยขนาดตะแกรงร่อนเบอร์ 90 เมช ($178\mu\text{m}$), 120 เมช ($125\mu\text{m}$), 150 เมช ($104\mu\text{m}$), 180 เมช ($89\mu\text{m}$) และ 200 เมช ($75\mu\text{m}$) ทางผู้วิจัยจึงทดลองใช้อนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมขนาดต่างผสมในพอลิพรอพิลีน โดยผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5% ที่ตัวแปรการผสม การขึ้นรูปและทดสอบแรงดึงแบบเดียวกันกับการเลือกช่วงการผสม เพื่อเลือกขนาดอนุภาคที่ส่งผลให้พอลิพรอพิลีนมีสมบัติที่ดีที่สุด

3.1 การทดสอบแรงดึงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตากรันอะลูมิเนียมเพื่อเลือกขนาดอนุภาค

ก. โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

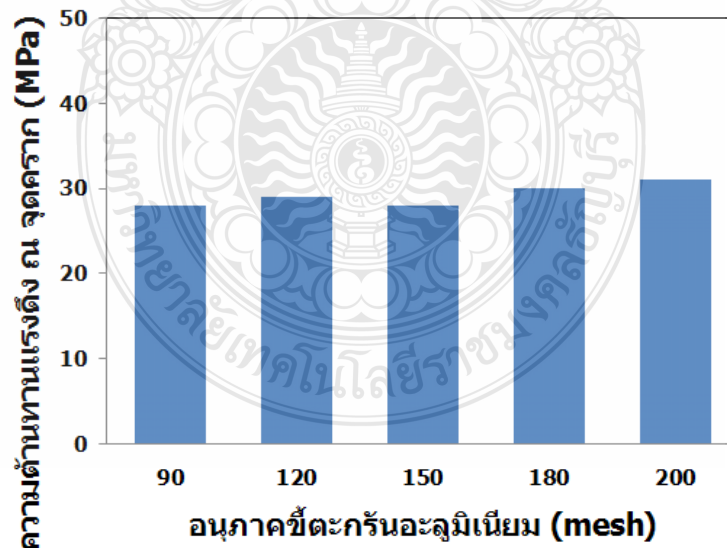
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลในพอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง [6]



รูปที่ ก.12 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตากรันอะลูมิเนียมที่อนุภาคขนาดต่างๆ

ข. ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)

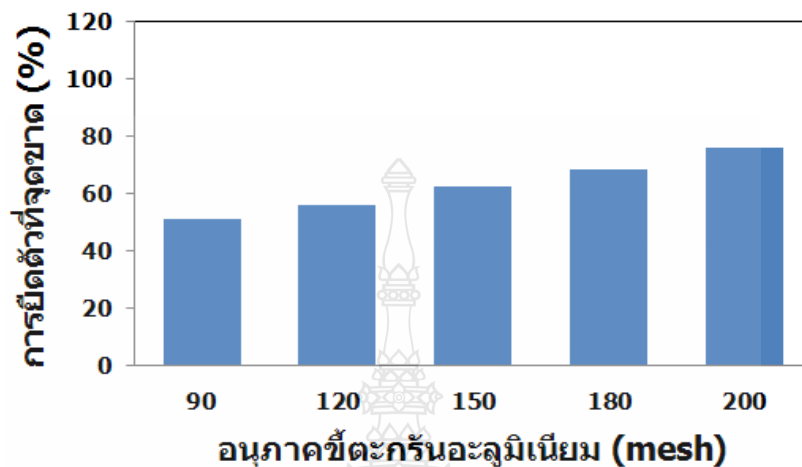
ขนาดของอนุภาคไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากโดยขนาดอนุภาคของซีตากรันอะลูมิเนียมที่มีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากดีที่สุดคือ ที่ 200 เมช



รูปที่ ก.13 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตากรันอะลูมิเนียมที่อนุภาคขนาดต่างๆ

ค. เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

พอลิพรอพิลีนมีแนวโน้มสามารถยืดตัวได้สูงขึ้น เมื่อผสมกับซีตะกักรันอะลูมิเนียมที่มีอนุภาคขนาดเล็กลง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะส่งผลในพอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่



รูปที่ ก.14 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกักรันอะลูมิเนียมที่อนุภาคขนาดต่างๆ

3.2 สรุปผลการทดลองการเลือกขนาดอนุภาคซีตะกักรันอะลูมิเนียม

จากการทดลองพบว่าซีตะกักรันอะลูมิเนียมที่ขนาด 200 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด จะส่งผลให้สมบัติของพอลิพรอพิลีนดีที่สุด [5][6][8] ทางผู้วิจัยจึงเลือกซีตะกักรันอะลูมิเนียมขนาด 200 เมช ผสมในพอลิพรอพิลีน ที่ช่วงการผสม 1-9 % โดยน้ำหนัก

4. การผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตะกักรันอะลูมิเนียมขนาด

จากการเลือกช่วงปริมาณการผสมซีตะกักรันอะลูมิเนียม และการเลือกขนาดอนุภาคซีตะกักรันอะลูมิเนียม ผู้วิจัยจึงใช้ซีตะกักรันอะลูมิเนียมอนุภาคขนาด 200 เมช ที่สัดส่วนการผสมซีตะกักรันอะลูมิเนียม 1-9 % โดยน้ำหนัก ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดยมีตัวแปรการผสมดังแสดงในตาราง ก.2



รูปที่ ก.15 เส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

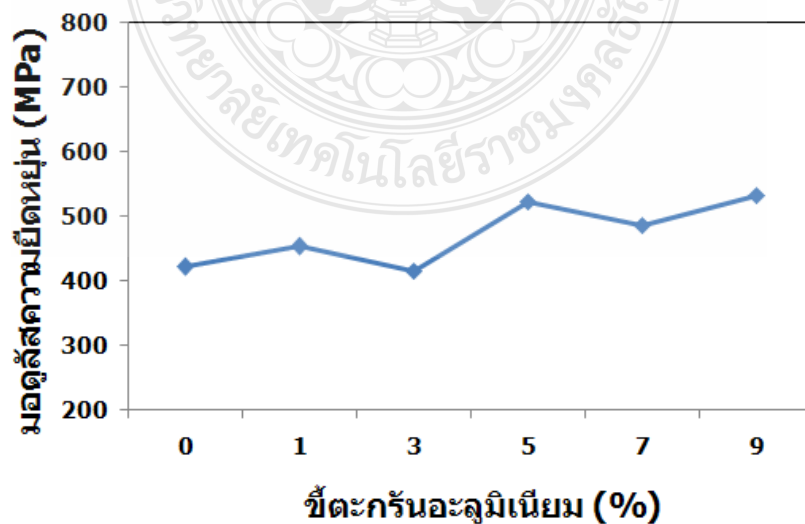
ตารางที่ ก.2 การผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตะกัณอะลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาค 200 เมช

ลำดับ	พอลิเมอร์ผสม	อัตราส่วนผสม PP: dross (wt %)	อุณหภูมิ (°C) zone1/zone2/zone3/die	ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)
1	PP: dross	100: 0	200/210/220/230	50
2	PP: dross	99:1	200/210/220/230	50
3	PP: dross	97:3	200/210/220/230	50
4	PP: dross	95:5	200/210/220/230	50
5	PP: dross	93:7	200/210/220/230	50
6	PP: dross	91:9	200/210/220/230	50

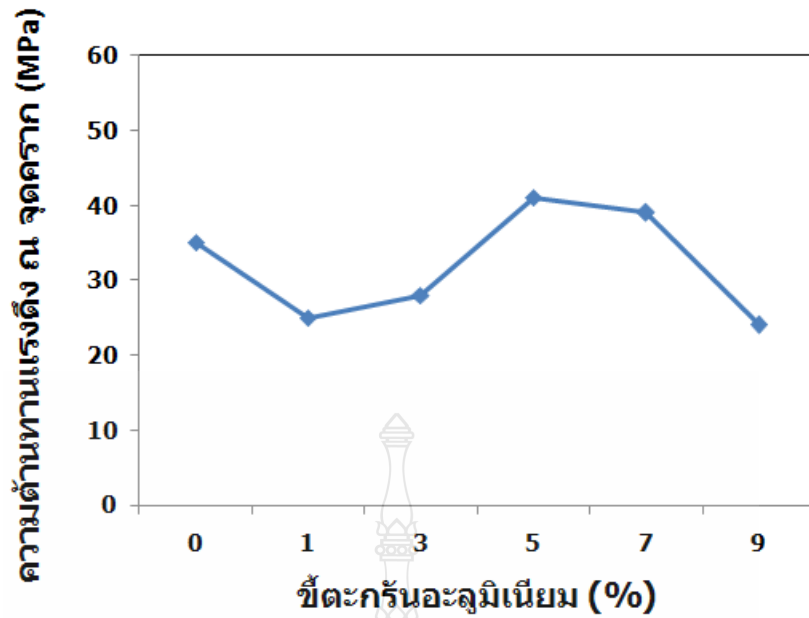
จากการผสมพบว่าพอลิเมอร์ผสมเมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมที่มีความใสอยู่คือที่ ปริมาณการผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 1 และ 3 % พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคซีตะกัณอะลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอ ผิวของของพอลิเมอร์ที่ผสมได้มีความหยาบ ที่ปริมาณการผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 7 และ 9 % ผิวเกิดมีลักษณะหยาบเป็นรอบแตก (Shark skin) มีฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ผสม มีความเปราะมากสามารถหักได้ง่าย

4.1 การทดสอบแรงดึง

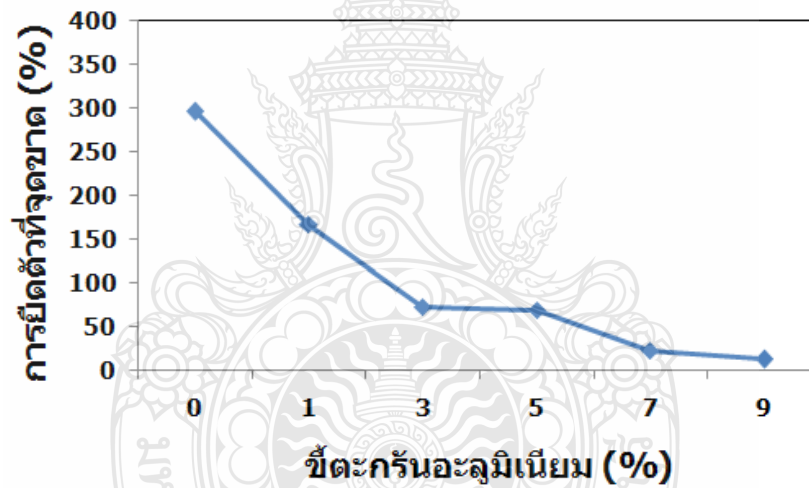
จากการทดสอบแรงดึงพบว่า ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น การยืดตัวที่จุดขาด และ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากมีความผันผวน ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (แสดงในรูป ก. 16, ก.17 และ ก. 18)เนื่องจากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวนั้นทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ มีความบกพร่องในเรื่องความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของอนุภาคซีตะกัณอะลูมิเนียม และการควบคุมความชื้นในการผสมควบคุมได้ยาก



รูปที่ ก.16 มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกัณอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ



รูปที่ ก.17 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ



รูปที่ ก.18 การยัดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

จากผลการทดลองที่มีความผกผันดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงเปลี่ยนวิธีการผสมจากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว มาเป็นเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ซึ่งมีความสามารถในการผสมที่จะทำให้อนุภาคซีตกรันอะลูมิเนียมมีการกระจายตัวในพอลิพรอพิลีนได้สม่ำเสมอ และควบคุมความชื้นได้ดี โดยแสดงรายละเอียดการผสมไว้ในบทที่ 3 ผลการทดลองในบทที่ 4 และสรุปผลการทดลองในบทที่ 5