

การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับอะลูมิเนียมออกไซด์
ที่เหลือใช้จากกระบวนการหล่อฉีด

STUDY ON PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE BETWEEN POLYPROPYLENE
WITH WASTE ALUMINUM OXIDE FROM DIE CASTING PROCESS

มนัส ศรีสวัสดิ์

MANUS SRISWAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับอะลูมิเนียมออกไซด์
ที่เหลือใช้จากกระบวนการหล่อฉีด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

**STUDY ON PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE BETWEEN POLYPROPYLENE
WITH WASTE ALUMINUM OXIDE FROM DIE CASTING PROCESS**



MANUS SRISWAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN MANUFACTURING ENGINEERING DEPARTMENT OF INDUSTRIALS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายมนัส ศรีสวัสดิ์





ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน
กับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่หล่อใช้จากกระบวนการหล่อฉีด
STUDY ON PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE
BETWEEN POLYPROPYLENE WITH WASTE ALUMINUM
OXIDE FROM DIE CASTING PROCESS

ชื่อนักศึกษา

นายมนัส ศรีสวัสดิ์

รหัสประจำตัว

115170440108-2

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

วัน เดือน ปี ที่สอบ

10 ตุลาคม 2553

สถานที่สอบ

ห้องประชุมเฟื่องทอง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร. สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

..... กรรมการ

(ดร. ศิริชัย ต่อสกุล)

..... กรรมการ

(ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เหลือใช้จากกระบวนการหล่อฉีด
ชื่อนักศึกษา	นายมนัส ศรีสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	115170440108-2
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

บทคัดย่อ

ซีตะกรันอะลูมิเนียมเป็นขยะอุตสาหกรรมที่เกิดจากกระบวนการหล่อ โดยซีตะกรันอะลูมิเนียมเหล่านี้จะมีการนำกลับไปใช้ประโยชน์น้อย ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าได้มีการนำวัสดุต่างๆมาผสมในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆให้กับพอลิเมอร์ โดยเฉพาะการผสมผงวัสดุประเภทโลหะลงในพอลิเมอร์ จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางด้านความแข็งเพิ่มขึ้น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำซีตะกรันอะลูมิเนียมนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำไปผสมกับพอลิเมอร์ นอกจากจะได้วัสดุผสมชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ดีขึ้นจากเดิมแล้ว ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะอุตสาหกรรมอีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาทดลองนำซีตะกรันอะลูมิเนียมมาเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิพรอพิลีน โดยการนำซีตะกรันอะลูมิเนียมไปบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดลดขนาดวัตถุด้วยลูกบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 μm จากนั้นมาผสมกับพอลิพรอพิลีน ด้วยขบวนการผสมแบบหลอมละลายโดยการผสมในเครื่องผสมภายใน ที่สัดส่วนการผสมซีตะกรันอะลูมิเนียมในพอลิพรอพิลีน 1, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ แล้วทดสอบสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางความร้อน

จากการวิจัยพบว่าซีตะกรันอะลูมิเนียมสามารถนำมาเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิพรอพิลีนได้ โดยซีตะกรันอะลูมิเนียมที่แทรกตัวอยู่ในพอลิพรอพิลีนทำให้พอลิพรอพิลีนมีสีเข้มขึ้นเป็นสีเทา เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าซีตะกรันอะลูมิเนียมส่งผลให้ ค่าความแข็ง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าการต้านทานการเสียดทาน ของพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีตะกรันอะลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้น แต่จะมีความสามารถในการยึดตัวต่ำลง ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซีตะกรันอะลูมิเนียมส่งผลให้พอลิพรอพิลีนเกิดผลึกมากขึ้น โดยอุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 117 -122 องศาเซลเซียส ส่งผลให้วัสดุผสมที่ได้มีสมบัติไปในทางที่มีความแข็งเกร็งมากขึ้น

คำสำคัญ : อะลูมิเนียมออกไซด์, ซีตะกรันอะลูมิเนียม, พอลิพรอพิลีน, วัสดุผสม

Thesis Title : STUDY ON PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE
BETWEEN POLYPROPYLENE WITH WASTE ALUMINUM
OXIDE FROM DIE CASTING PROCESS

Students Name : Mr. Manus Sriswat

Student ID : 115170440108-2

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Manufacturing Engineering

Year of Achievement : 2010

Thesis Advisor : Dr. Kitipong Kimapong

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 becames 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

คณะผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณอย่างยิ่งต่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิดในการดำเนินวิทยานิพนธ์และการเขียนวิทยานิพนธ์ตลอดจนการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี กรรมการผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำแนวคิด ในการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์ และ อาจารย์เจษฎา วงษ์อ่อน อาจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ได้ให้ คำแนะนำแนวคิดในการวิจัย ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเพื่อเครื่องขึ้นรูปและเครื่อง ทดสอบ และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ เอื้อเพื่อเครื่องขึ้นรูปและเครื่องทดสอบ ขอขอบพระคุณบริษัท เอนโก ไทย จำกัด ในความ อนุเคราะห์ที่ตะกรันอะลูมิเนียม และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และเพื่อนๆสำหรับความช่วยเหลือและ กำลังใจในการทำงาน

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้ความรักและ กำลังใจในการเรียนและการดำเนินชีวิต จนประสบความสำเร็จในทุกวันนี้

มนัส ศรีสวัสดิ์

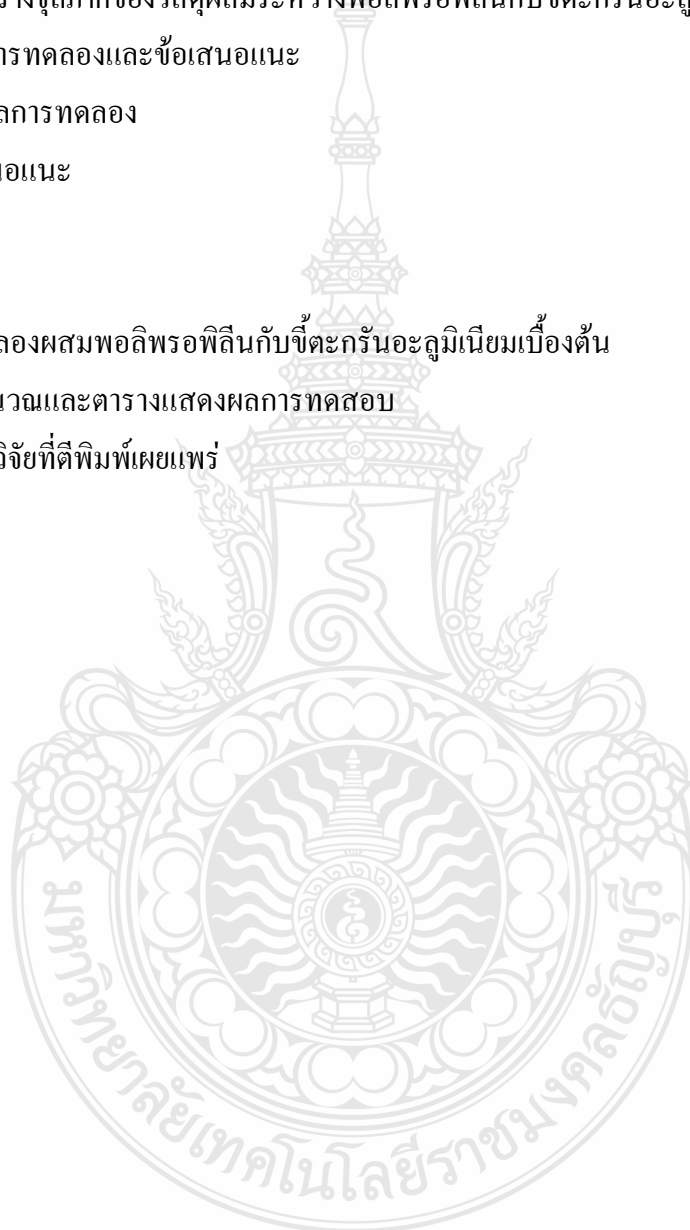
10 ตุลาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	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 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พอลิเมอร์	3
2.2 สารตัวเติม (Filler)	9
2.3 การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม	13
2.4 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อกระบวนการผลิต	13
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	33
3.4 การผสมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีนกับสารตัวเติม	37
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล	44
3.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนจากเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)	50
3.7 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	52
4.1 สารตัวเติมซีตะกรันอะลูมิเนียม (Dross, Al_2O_3)	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 อิทธิพลของปริมาณจีตระกูลันอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ	54
4.3 อิทธิพลของปริมาณจีตระกูลันอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกล	57
4.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับจีตระกูลันอะลูมิเนียม	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	
ก การทดลองผสมพอลิพรอพิลีนกับจีตระกูลันอะลูมิเนียมเบื้องต้น	76
ข การคำนวณและตารางแสดงผลการทดสอบ	88
ค ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	95
ประวัติผู้เขียน	111



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน	9
2.2 ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์	10
2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์	12
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	32
3.2 สมบัติของเม็ดพลาสติก	32
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	33
3.4 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore Durometer ชนิด A และ D	47



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างแบบเส้น	4
2.2	โครงสร้างแบบกิ่ง	5
2.3	โครงสร้างแบบร่างแห	5
2.4	การจัดเรียงตัวของอะตอมภายใน โครงสร้างของพอลิพรอพิลีน	8
2.5	WAXD pattern ของ โครงสร้างแบบต่าง ๆของ Isotactic Polypopropylene	8
2.6	ลักษณะของอนุภาคและการรวมตัวของอนุภาค	15
2.7	แสดงของการเกิดผลึกจากเทคนิค DSC ของพอลิพรอพิลีน	19
2.8	อิทธิพลของสารก่อผลึกต่อขนาดของ Spherulite ของพอลิพรอพิลีน	20
2.9	DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของ โพลีโพรพิลีน	21
2.10	ขนาดและการกระจายขนาดของผลึกในโครงสร้างโมเลกุลของ โพลีโพรพิลีน แลวนไม่ได้ใส่สารก่อผลึก แลวต่างใส่สารก่อผลึก	21
2.11	ลักษณะของตะแกรงที่ใช้คัดขนาด	25
2.12	เครื่องมือในการคัดแยกแบบเปียก	25
2.13	เครื่องมือคัดแยก Hydrocyclone	26
2.14	ไซโคลนในการคัดขนาดแบบแห้ง	26
3.1	แสดงแผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	31
3.2	เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีน PP เกรด H255JA	32
3.3	ซีตระกันอะลูมิเนียม	34
3.4	การล้างทำความสะอาดซีตระกันอะลูมิเนียม	34
3.5	เครื่องบดลดขนาดวัตถุด้วยลูกบด (Ball Mill)	35
3.6	เครื่องร่อนคัดแยกขนาด	35
3.7	ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาด 200 เมช	35
3.8	ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาด 200 เมช	36
3.9	ซีตระกันอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัดขนาด	36
3.10	เครื่องผสมภายใน (Internal Mixer)	38
3.11	ใส่เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนลงในเครื่องผสมภายใน	38
3.12	ใส่ซีตระกันอะลูมิเนียมบดลงไปผสมกับพอลิพรอพิลีน	38
3.13	วัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตระกันอะลูมิเนียม	39
3.14	เครื่องตัดเม็ดพลาสติก	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.15	พอลิพอฟริลีน 100% จากการผสมในเครื่องผสมภายใน	39
3.16	พอลิพอฟริลีนที่ผสมจี๊ตระกรันอะลูมิเนียม 1 wt%	40
3.17	พอลิพอฟริลีนที่ผสมจี๊ตระกรันอะลูมิเนียม 5 wt%	40
3.18	พอลิพอฟริลีนที่ผสมจี๊ตระกรันอะลูมิเนียม 7 wt%	40
3.19	ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงดึงตาม ASTM D 638 type IV	41
3.20	แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV	41
3.21	เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	42
3.22	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV	42
3.23	ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบความเสียดทานตาม DIN 53516	43
3.24	แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516	43
3.25	ชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516	43
3.26	ลักษณะของมูมียัดที่ใช้กำหนดจุดความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก	44
3.27	ลักษณะของกราฟที่ใช้ในการคำนวณหา Initial Maximum Modulus	45
3.28	เครื่องทดสอบแรงดึง	45
3.29	การทดสอบแรงดึง	46
3.30	ชิ้นงานทดสอบจากการทดสอบแรงดึง	46
3.31	เครื่องทดสอบความแข็งแบบชอร์ดี	48
3.32	การวัดค่าความแข็ง	48
3.33	เครื่องทดสอบความเสียดทาน	49
3.34	เครื่องทดสอบความเสียดทาน	50
3.35	การจับชิ้นงานทดสอบความเสียดทาน	50
4.1	จี๊ตระกรันอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัดขนาด	52
4.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจี๊ตระกรันอะลูมิเนียมบดจากเครื่องมาสเตอร์ไรซ์เซอร์ เอส	53
4.3	ส่วนผสมทางเคมีหลักของจี๊ตระกรันอะลูมิเนียม (Dross)	54
4.4	ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณการผสมที่สัดส่วนต่างๆ	55
4.5	อุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิพอฟริลีนที่ผสมกับจี๊ตระกรันอะลูมิเนียมสัดส่วนต่างๆ	56
4.6	อุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิพอฟริลีนที่ผสมกับจี๊ตระกรันอะลูมิเนียมสัดส่วนต่างๆ	57
4.7	มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพอฟริลีนที่ผสมกับจี๊ตระกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0-9 wt%	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	59
4.9 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	60
4.10 ความแข็งของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	61
4.11 น้ำหนักที่ลดลงจากการทดสอบความเสียดทานของพอลิพรอพิลีนที่ปริมาณ การผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%	62
4.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน 100% (X500)	63
4.13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของ พอลิพรอพิลีน 100% (X1000)	63
4.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1 wt% (X200)	64
4.15 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1 wt% (X1000)	64
4.16 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 3 wt% (X500)	65
4.17 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 3 wt% (X1000)	65
4.18 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5 wt% (X500)	66
4.19 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5 wt% (X1000)	66
4.20 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7 wt% (X200)	67
4.21 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพรอพิลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7 wt% (X500)	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพอพริลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7 wt% (X1000)	68
4.23 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพอพริลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 9 wt% (X200)	69
4.23 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพอพริลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 9 wt% (X500)	69
4.24 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของพอลิพอพริลีน ที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 9 wt% (X1000)	70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบในชีวิตประจำวันและใช้ในงานต่างๆ มาก รองจากเหล็กและทองแดง เช่น ใช้ทำภาชนะในครัวเรือนของใช้อื่น ๆ และวัสดุก่อสร้าง อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่นำไปใช้แทนเหล็กและทองแดงมากขึ้นทุกที โดยข้อดีของอะลูมิเนียมคือเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบากว่าเหล็กและทองแดง มีราคาถูกและไม่เกิดสนิม ในกระบวนการผลิตล้อแม็กรถยนต์นั้น ขั้นตอนของการหลอมอะลูมิเนียมจะมีการเติมฟลักซ์ (Flux) ลงไป เพื่อกำจัดสารมลทินในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว จะมีอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งลอยขึ้นเหนือผิวหน้าอะลูมิเนียมหลอมเหลวผสมมากับฟลักซ์ ที่เรียกว่าชีตะกรันอะลูมิเนียม, กาก หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide, Al_2O_3) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการหลอมอะลูมิเนียม โดยอะลูมิเนียมออกไซด์ส่วนนี้จะมีการนำกลับไปใช้ใหม่น้อย จึงเป็นวัสดุที่จะต้องถูกนำไปทิ้งหรือกำจัดโดยเปล่าประโยชน์

ปัจจุบันได้มีการพยายามนำวัสดุต่างๆ ทั้งโลหะ อโลหะ ไม้ ยาง ฯ มาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ ให้กับพอลิเมอร์นั้นๆ เช่น สมบัติทางกล และสมบัติทางด้านความร้อนเป็นต้น ซึ่งเรียกว่าพอลิเมอร์ผสม โดยมีงานวิจัยต่างๆ ที่นำวัสดุมาผสมกับพอลิเมอร์ เช่น ผสมเปลือกหอยแครงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพื่อเพิ่มความแข็งและเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก [14], ผสมอะลูมิเนียมฟอยล์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพื่อเพิ่มความแข็ง [15], ผสม UFPR และ SBS ในพอลิพรอพิลีนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและต้านทานความร้อน [16], ผสมผงสังกะสีในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นเพื่อเพิ่มสมบัติทางด้านความร้อน [23], ผสมผงทองแดงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นเชิงเส้น (LLDP) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า [24], ผสมคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ในเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ (PPS) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเสียดทาน [25], ผสม MoS_2 , Al_2O_3 , CuS และธาตุอื่นๆ ในพอลิเอทิลีนซัลไฟด์เพื่อเพิ่มความสามารถในการเสียดทานและการสึกหรอ [26], และผสมผงโลหะกับพีวีซี (PVC) เพื่อเพิ่มสมบัติทางด้านไฟฟ้า [27] เป็นต้น

จากงานวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำชีตะกรันอะลูมิเนียมนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำชีตะกรันอะลูมิเนียมไปบดให้เป็นผงแล้วนำมาผสมกับพอลิพรอพิลีนเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ ที่มีสมบัติทางด้านความแข็งแรง การเสียดทาน และทางความร้อนดีขึ้นกว่าพอลิพรอพิลีนธรรมดา เพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่เหมาะสม และเป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียม มาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียม

1.2.2 เพื่อศึกษาการค้นคว้าวัสดุผสมชนิดใหม่

1.2.3 เพื่อศึกษาขบวนการผสมและสมบัติทางกล และ โครงสร้างของวัสดุผสมที่ได้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.4.1 สามารถใช้ประโยชน์จากขี้ตระกรันอะลูมิเนียมที่เหลือจากกระบวนการหลอมอะลูมิเนียม

1.4.2 ทราบถึงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับขี้ตระกรันอะลูมิเนียม

1.4.3 สามารถนำวัสดุผสมนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

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

1.3.2 ขี้ตระกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในการผสม มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า $75\ \mu\text{m}$ ซึ่งคัดแยกขนาดจากตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve) ขนาด 200 เมช (Mesh)

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อน

ก. อุณหภูมิหลอมเหลว

ข. อุณหภูมิการเกิดผลึก

1.3.3 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)

1.3.4 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)

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสแลกของอะลูมิเนียม ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังนั้นจะนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับพอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่พอลิพรอพิลีนสารตัวเดิมอะลูมิเนียมออกไซด์ อิทธิพลของสารตัวเดิมต่อโครงสร้าง กระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิเมอร์ และกล่าวถึงพอลิพรอพิลีนซึ่งใช้ในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเดิมต่อโครงสร้างผลึก รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 พอลิเมอร์ (Polymer) [1]

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

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

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

พอลิเมอร์สังเคราะห์ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกือบทุกชนิด พอลิเมอร์มีการใช้ในการยึดเกาะและการหล่อลื่นอย่างกว้างขวาง เช่นเดียวกับการใช้เป็นโครงสร้างตั้งแต่ของเด็กเล่นจนถึงยานอวกาศ มีการใช้เป็นยาทางชีวภาพในฐานะเป็นตัวขนส่งยาในสิ่งมีชีวิต พอลิเมอร์เช่น พอลิเมทิล เมทาคริเลต ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตเรซิสในอุตสาหกรรมกึ่งตัวนำ และสารไดอิเล็กทริก โปแตสเซียมต่ำสำหรับใช้ในคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง ปัจจุบันยังมีการพัฒนาพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นได้สำหรับอิเล็กทรอนิกส์

2.1.1 โครงสร้างของพอลิเมอร์ [1]

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 ขุ่นเหนียวกว่าโครงสร้างอื่นๆ ตัวอย่าง เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์, พอลิโพรพิลีน, พอลีสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ดังแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 โครงสร้างแบบเส้น [1]

ข. พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้นและโซ่ยาว กิ่งที่แตกออกจากพอลิเมอร์ของโซ่หลักทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มาก พอลิเมอร์แบบกิ่งจึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำยืดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้

ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกล่าวคือ เมื่อร้อนจะอ่อนตัวและเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว ตัวอย่าง เช่น พอลิเอทิลีน ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง

แบบกึ่ง [1]

ค. พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross Linked Polymer)

เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแห พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรงและเปราะหักง่าย ดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบ

ร่างแห [1]

2.1.2 พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [1]

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก และ เทอร์โมเซตติงพลาสติก

ก. เทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด ได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้ โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลว หรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ตัวอย่าง พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ ชนิดของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมพลาสติก ได้แก่

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

- โพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แข็งกว่าโพลีเอทิลีนทนต่อสารไขมันและความร้อนสูง ใช้ทำแผ่นพลาสติก ถูพลาสติกบรรจุอาหารที่ทนร้อน 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 ทำแผ่นแลมినตชั้นในของถาดพลาสติกไนลอน (Nylon) เป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก คงทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ทำแผ่นแลมినตสำหรับทำถาดพลาสติกบรรจุอาหารแบบสุญญากาศ

- โพลีเอทิลีน เทอร์เฟธาเลต (Terylene: Polyethylene Terephthalate) เหนียวมาก โปร่งใส 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 และโดยมากต้องการแรงอัดด้วยเทอร์โมเซตติงพลาสติก ได้แก่

- เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) มีสมบัติทางเคมีทนแรงดันได้ 7,000-135,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงอัดได้ 25,000-50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงกระแทก

ได้ 0.25-0.35 นิวตันเมตร ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทนความร้อนได้ถึง 140 องศาเซลเซียส และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนยาก เมลามีนใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารหลายชนิด และนิยมใช้กันมาก มีทั้งที่เป็นสีเรียบและลวดลายสวยงาม ข้อเสียคือ น้ำส้มสายชูจะซึมเข้าเนื้อพลาสติกได้ง่าย ทำให้เกิดรอยต่าง แต่ไม่มีพิษภัยเพราะไม่มีปฏิกิริยากับพลาสติก

- ฟีนอลฟอร์มาดีไฮด์ (Phenol-Formaldehyde) มีความต้านทานต่อตัวทำละลาย สารละลายเกลือและน้ำมัน แต่พลาสติกอาจพองบวมได้เนื่องจากน้ำหรือแอลกอฮอล์พลาสติกชนิดนี้ ใช้ทำฝาขวดและหม้อ

- อีพ็อกซี (Epoxy) ใช้เคลือบผิวของอุปกรณ์ภายในบ้านเรือน และท่อเก็บก๊าซ ใช้ในการเชื่อมส่วนประกอบโลหะ แก้ว และเซรามิก ใช้ในการหล่ออุปกรณ์ที่ทำจากโลหะและเคลือบผิว อุปกรณ์ ใช้ในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เส้นใยของท่อ และท่อความดัน ใช้เคลือบผิวของ พื้นและผนัง ใช้เป็นวัสดุของแผ่นกำบังนิวตรอน ซีเมนต์ และปูนขาว ใช้เคลือบผิวถนน เพื่อกันลื่น ใช้ทำโฟมแข็ง ใช้เป็นสารในการทำสีของแก้ว

- โพลีเอสเตอร์ (Polyester) กลุ่มของโพลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ (-O•CO-) ในหน่วยซ้ำ เป็นโพลิเมอร์ที่นำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ทำพลาสติกสำหรับเคลือบผิว ขวดน้ำ เส้นใย พิล์ม และยาง เป็นต้น ตัวอย่างโพลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต โพลีบิวทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลิเมอร์ผลึกเหลวบางชนิด

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

- โพลียูรีเทน (Polyurethane) โพลิเมอร์ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน (-NH•CO•O-) เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนต (Di-isocyanates) กับ ไดออล (Diols) หรือ ไตรออล (Triols) ที่เหมาะสม ใช้เป็นกาว และน้ำมันชักเงา พลาสติกและยาง ชื่อย่อคือ PU

2.1.3 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) [1]

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

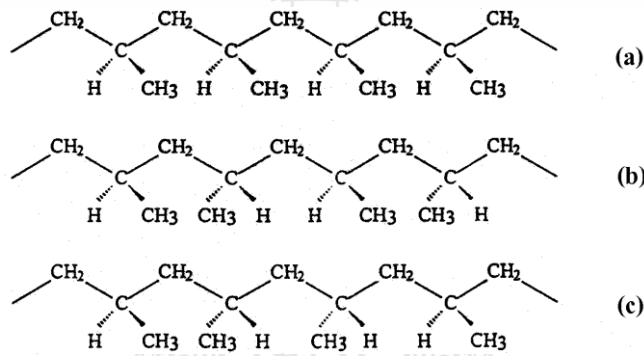
ก. โครงสร้างและสมบัติของพอลิพรอพิลีน

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

นอกจากการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างแล้วพอลิพรอพิลีนยังมี โครงสร้างผลึกแบ่งเป็น โครงสร้างแบบ α (α -form) มีโครงสร้างผลึกแบบ Monoclinic โครงสร้างแบบ β

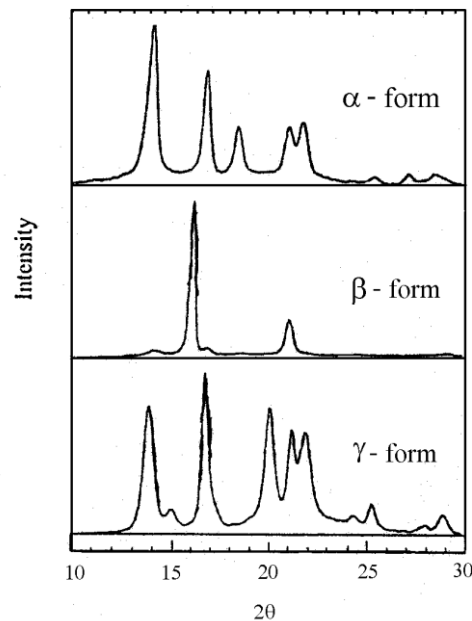
(β -form) มีโครงสร้างผลึกเป็น Hexagonal และ โครงสร้างแบบ γ (γ -form) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Triclinic ซึ่งโครงสร้างแต่ละแบบจะมี Diffraction Pattern ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.5 [7] โดยทั่วไปพอลิพรอพิลีนจะมีรูปแบบโครงสร้างเป็น α -form และแสดง diffraction peak ที่มุม 2θ ที่ 14.2, 17.0 และ 18.8° ในระนาบ (110), (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 [1]



รูปที่ 2.5 WAXD pattern ของ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของ Isotactic Polypropylene [1]

ข. สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

พอลิพรอพิลีนที่ใช้งานมากจะเป็นแบบที่มีการจัดเรียงตัวแบบ Isotactic จะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา มีความเป็นผลึกสูง เป็นพอลิเมอร์ที่จัดว่าเป็นพลาสติกที่เบาที่สุด มีความหนาแน่น 0.905 g/cm^3 จากความเป็นผลึกที่สูงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนดี มีความเหนียว แข็งแกร่ง ความแข็งแรงดึงสูง การที่มีจุดหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีนทำให้พอลิพรอพิลีนสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของพอลิพรอพิลีน

พอลิพรอพิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและคลอริเนตไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ทนต่อกรดและด่าง มีความเสถียรต่อความร้อนและแสงแดดต่ำ พอลิพรอพิลีนนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ อุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน ภาชนะและบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ใช้ทำเป็นเส้นใย และงานฟิล์ม เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน [1]

สมบัติ	ปริมาณ
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.90-0.91
อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	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 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.2 สารตัวเติม (Filler) [2]

วัตถุประสงค์ของการใช้สารตัวเติมในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเมอร์ คือ เพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบ ปรับปรุงกระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผสมกับสารตัวเติม อิทธิพลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์แบ่งเป็น

2.2.1 อิทธิพลในการเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Extender Filler) [2]

- ทำให้ความหนาแน่น ความแข็ง และโมดูลัสเพิ่มขึ้น
- มีการหดตัว (Shrinkage) ลดลง
- ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแคบลง

ง. ช่วยปรับปรุงลักษณะของพื้นผิว

จ. ลดต้นทุน

2.2.2 อิทธิพลในการเป็นสารเสริมแรง (Reinforcing Filler) [2]

ก. ส่งผลให้ความแข็งแรง ความแข็งแรงดึง และ โมดูลัส เพิ่มขึ้น

ข. ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแคบลง

ง. ปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกดีขึ้น

สารตัวเติมที่นำมาใช้มีหลายประเภทจะมีขนาด รูปร่าง และการยึดเกาะกับพอลิเมอร์แตกต่างกัน เนื่องจากในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้จากขี้ตะกรันของอลูมิเนียม

ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์ [2]

สารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic filler)	สารตัวเติมอินทรีย์ (Organic filler)
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)	ผงไม้ (Wood flour)
ไมกา (Mica)	เยื่อ ไม้ (Wood pulp)
ทัลค์ (Talc)	แป้ง (Starch)
เคลลิน (kaolin)	
วอลลาสตโทไนต์ (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) [3]

ในการหลอมอลูมิเนียมจะมีออกไซด์เกิดขึ้น ถ้ามีน้ำหนักเบาจะลอยขึ้นไปอยู่เหนือผิวโลหะเหลวเรียกว่าขี้ตะกรันอะลูมิเนียม กาก หรือ Dross ถ้ามีน้ำหนักรวมจะจมอยู่ใต้โลหะเหลวเรียกว่า ขี้ได้ (Sludge)

Aluminum Oxide ที่บริสุทธิ์ เป็นผลึกสีขาว 1 โมเลกุลประกอบขึ้นด้วย Al₂ อะตอม และ O₃ อะตอมเขียนเป็นสูตรโมเลกุลได้ว่า Al₂O₃ มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่าอลูมินา (Alumina) ชนิดที่

บริสุทธิ์เกือบ 100 % และเกิดในธรรมชาติเรียกว่า Corundum ทั้ง Alumina และ Corundum เป็นสารที่แข็งแรงแต่ไม่แข็งเท่า Corborundum หรือเพชร แต่ราคาถูกกว่า ทั้งยังใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น Corundum ชื่นเล็กๆ ใช้ประกอบในเครื่องจักรนาฬิกาและเครื่องมืออื่นๆ Al_2O_3 มีโครงสร้างที่แข็งแรงและต่อกันอย่างซับซ้อน เราจึงไม่สามารถเขียนสูตรโมเลกุลได้ ที่เราเขียน Al_2O_3 นั้นเป็นเพียงสูตร Empirical เท่านั้น Al_2O_3 ที่เกิดในธรรมชาติจะเกิดอยู่ในแร่ Corundum ซึ่งเป็นผลึกที่ใส ไม่มีสีแต่ที่เกิดเป็นพลอยสีต่างๆ ก็เนื่องมาจากมีออกไซด์ของโลหะที่มีสีอยู่ด้วย

Aluminum Oxide ที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดคือ Bauxite ซึ่งครั้งแรก Purified มาจากซิลิกอนและอะตอมของธาตุเจือปนอื่นๆ ได้ออกมาเป็นผงสีขาว เรียกว่าอลูมินา ละลายได้ในแร่หลอมเหลว เรียกว่า Cryolite 1 โมเลกุลประกอบขึ้นด้วย Al, F และธาตุอื่นๆ สารนี้เป็นสารสำคัญทำให้ Hall และ Herout พบวิธีแยก Al ได้ อย่างสะดวกสบาย เพราะว่ามีอลูมินาอยู่ด้วยเมื่อให้ความร้อนสูงๆ จะกลายเป็นของเหลว ซึ่งทั้งคู่เก็บของเหลวที่ได้นี้ไว้บนเบ้าถ่านแล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านลงไปไปในของเหลว โมเลกุล Aluminum Oxide จะถูกทำให้แยกออกจากกัน อะตอมของ Al จะตกเป็นตะกอนอยู่ก้นภาชนะ คือเบ้าถ่าน ในลักษณะโลหะหลอมเหลว ในเวลาต่อมาหลังจากการค้นพบ ราคาที่ลดน้อยลงเพียงปอนด์ละ 30% หรือถูกกว่านั้น ดังนั้น Al จึงกลายเป็นโลหะที่มีความสำคัญ ใช้กันแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน ถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมจะเป็นโลหะที่มีมากที่สุด และความเป็นจริงเป็นธาตุที่มีมากเป็นที่สามของธาตุทั้งหมด แต่มีความสำคัญเป็นที่สองรองจากเหล็ก ส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะเป็นโลหะที่เตรียมยาก ส่วนมากอยู่ในรูปอะลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น เฟลสปาร์ แต่จากแร่นี้ก็ได้นำมาเตรียมอะลูมิเนียมที่บริสุทธิ์โดยประหยัดค่าใช้จ่ายไม่ได้ ในธรรมชาติมีออกไซด์ของอะลูมิเนียมอยู่ นั่นก็คือ แร่บอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งใช้เตรียมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ได้ด้วยวิธีทางไฟฟ้าแต่ต้องกำจัดเหล็กและซิลิกอนออกจากสินแร่ก่อน การทำบอกไซต์ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีของแบร์ (Bayer Process) ที่อาศัยสมบัติของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยนำออกไซด์ที่ไม่บริสุทธิ์มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH ที่ร้อน จะเกิดออลูมินาไฮดรอกไซด์ ซิลิกอนออกไซด์ก็จะละลายด้วย แต่เฟริกออกไซด์ไม่ละลาย เนื่องจากไม่มีสมบัติไฮดรอกไซด์ นำสารละลายที่ได้มากรองแล้วแยกเอาเฟริกออกไซด์ออก ทำสารละลายให้เย็นกวนกับอากาศ แล้วเติมผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นหัวเชื้อจะทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ตกตะกอนส่วนซิลิเกตยังคงอยู่ในสารละลาย ออลูมินาไฮดรอกไซด์จะตกผลึกจากสารละลายที่มีซัลเฟตและแคดอออนที่มีประจุบวกในน้ำให้สารประกอบที่เรียกว่า Alum ซึ่งเป็นเกลือของสสารชนิด Double Salt มีสูตรทั่วไป $MM'(SO_4)_{2,12} \cdot H_2O$ ในเมื่อเป็นแคดอออนที่มีประจุ +1 เช่น K^+ , Na^+ หรือ NH_4^+ และ M เป็นแคดอออนที่มีประจุ +3 เช่น Al +3, Fe+3 หรือ Cr +3 เมื่อเอาอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงจะคายน้ำออกและกลายเป็น Al_2O_3 ซึ่งบางทีเรียกอะลูมินา สารนี้เนื้อนุ่ม มีจุดหลอมเหลวสูง (ประมาณ 2000 องศาเซลเซียส) ใช้เป็นประโยชน์เป็นสารที่ทนความร้อนสูง ในการทำภาชนะที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ตามปกติอะลูมินามีสีขาว แต่จะมีสีเมื่อเติมออกไซด์บางตัว เช่น Cr_2O_3 , Fe_3O_4

อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารประกอบแน่นทึบมีสถานะคงที่มาก มีจุดหลอมเหลว 2050°C มีน้ำหนักจำเพาะ 3.9 มากกว่าโลหะเหลว 2.7 แต่มันจะไม่แยกตัวออกจากโลหะเหลวได้ง่าย เนื่องจากมีแรงตึงผิวสูงต่อโลหะเหลว

อะลูมิเนียมจะเกิดออกไซด์ได้ง่าย หากสัมผัสกับความชื้น ดังสมการที่ 2.1



โดยสาเหตุของการเกิดออกไซด์สูง คือ

- ก. จากโลหะที่มีออกไซด์อยู่แล้ว
- ข. เกิดจากการสันตะเทียน หรือการก่อควนโลหะเหลวขณะหลอม
- ค. เกิดการอลวน (Turbulent) ขณะขนถ่าย และ เทหล่อ
- ง. เศษโลหะมีธาตุ Mg เจืออยู่ในปริมาณมาก
- จ. บรรยากาศของเตาหลอมมีความชื้นสูง
- ฉ. หลอมที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป

การกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ส่วนมากจะใช้ ฟลูออไรด์ หรือ คลอไรด์ ซึ่งเกิด Electrolytic กับอลูมินัมได้ดี เชื้อหลอมจะห่อหุ้มอนุภาค Al_2O_3 แยกออกจากโลหะเหลวและหลังจากนั้นจะใช้วิธีทางกลโดยการสันตะเทียน โดยการควบคุมที่เตาหลอม หรือทำให้เกิดการควน หมุนวน เพื่อให้ Al_2O_3 ลอยขึ้นไปรวมกับขี้ตะกรัน กลายเป็นกากต่อไป ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์ ฉะนั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในงานวิจัยนี้จะมีฟลักซ์ (ฟลูออไรด์ , คลอไรด์) ผสมปะปนมาด้วย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมออกไซด์ [3]

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 [4]

การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมอาจเรียกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composite) วัตถุประสงค์ของการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม คือ ช่วยในการขึ้นรูปปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัส ช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบ และปรับปรุงการพิมพ์สีในงานฟิล์ม

ความแตกต่างระหว่างผิวของพอลิเมอร์กับสารตัวเติม คือการที่พอลิเมอร์เช่นพอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีนไม่มีขั้วจึงไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ที่แข็งแรง ทำให้การยึดตัวที่จุดขาด ความเหนียว และการรับแรงกระแทกจะลดลง ขณะที่สารตัวเติมส่งผลให้พอลิเมอร์มีโมดูลัสที่สูงขึ้นเนื่องจากความแข็งของสารตัวเติม ปัจจัยของสารตัวเติมที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ ได้แก่ ขนาด การกระจายตัวของสารตัวเติมในโครงสร้างของพอลิเมอร์ (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 จะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมดีขึ้น ซึ่งเมื่อสารตัวเติมสามารถกระจายตัวได้ดีก็จะส่งผลให้สามารถเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในการผสมได้

2.4 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อกระบวนการผลิต [4]

2.4.1 ลักษณะของการผสม [4]

ลักษณะของการผสมสามารถแบ่งการผสมได้เป็น

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

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 [4]

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 ซึ่งหลังจากการเตรียม ส่วนผสมเสร็จแล้ว 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 ให้การผสมที่มีความสม่ำเสมอของส่วนผสม โดยไม่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของส่วนผสมต่าง ๆ โดยให้การกระจายตัวของสารตัวเติมดี และมีความแน่นอนในการควบคุมการผสม

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

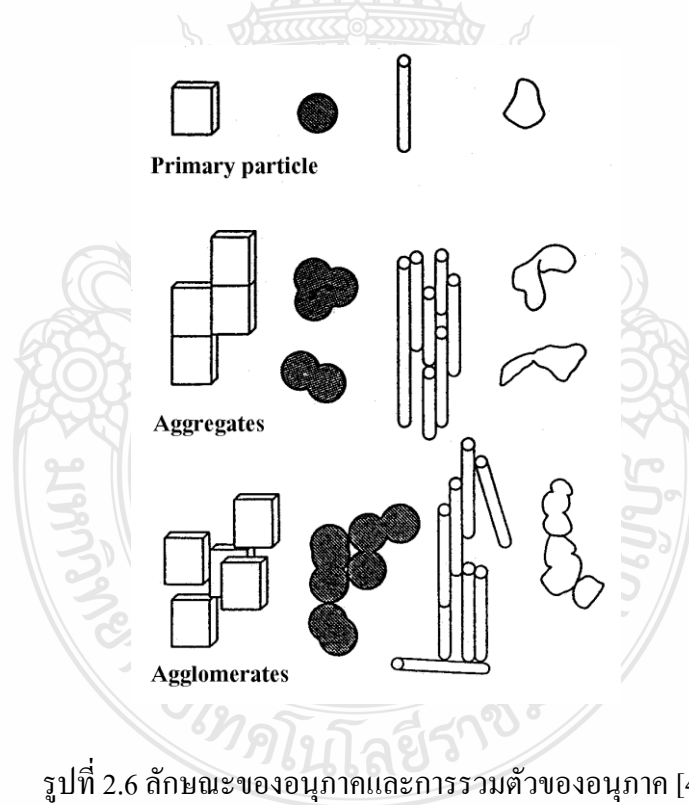
2.4.3 การรวมตัวของสารตัวเติม [4]

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 สามารถทำให้แต่ละอนุภาคที่มา รวมตัวกันแยกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวได้ โดยที่ Surface Area จะเท่ากับ Surface area ของแต่ละอนุภาค ที่มารวมกัน

2.4.4 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อความหนืด [4]

ผลของสารตัวเติมต่อความหนืด แบ่งได้เป็นอิทธิพลจากขนาดอนุภาค ปริมาณ Surface Area และ Aspect Ratio โดยมีรูปร่างดังรูปที่ 2.6 โดยที่อนุภาคขนาดเล็กจะมี Surface Area สูง จะยากต่อการกระจายตัวเมื่อผสมกับพอลิเมอร์ ทำให้ความหนืดของการผสมสูงขึ้น ทำปริมาณการผสมของ สารตัวเติมขนาดเล็กในพอลิเมอร์ต่ำ สารตัวเติมที่มี Aspect Ratio คืออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อ ความหนาของอนุภาคที่สูง จะทำให้ความหนืดของการผสมสูงด้วย เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของ ขนาดของอนุภาค พบว่าเมื่ออนุภาคมีการกระจายตัวที่กว้างจะมีความหนืดของการผสมที่ต่ำกว่าอนุภาค ที่มี การกระจายตัวที่แคบ



รูปที่ 2.6 ลักษณะของอนุภาคและการรวมตัวของอนุภาค [4]

2.5 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ [5]

2.5.1 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ [5]

การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบภายใน โครงสร้าง ทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะของ โครงสร้างผลึกเกิดขึ้น ความสามารถในการเกิดผลึกขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี การจัดเรียงตัวของ อะตอมภายในสายโซ่ และแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นใน โมเลกุลของพอลิเมอร์ รวมไปถึงสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้ในการผสม

ก. จลนศาสตร์ของการเกิดผลึก

เมื่อพอลิเมอร์ในสถานะหลอมเหลวถูกทำให้เย็นตัว จะมีผลึกเกิดขึ้น ซึ่งการเกิดผลึก จะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดผลึก และเวลา โดยที่อัตราการเกิดผลึกสามารถวัดได้จากเทคนิคการ เปลี่ยนแปลงทางความร้อน, การวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามอุณหภูมิ (Dilatometry), Infrared Spectroscopy และ Optical Microscope เป็นต้น ในการเกิดผลึกส่วนที่เป็นผลึกที่เกิดขึ้นต่อเวลา

สามารถศึกษาได้จากสมการของ 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, การ วัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Heat of Fusion) จากเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และการวัดความหนาแน่น

การเกิดผลึกจะขึ้นอยู่กับสถานะของการเกิดผลึก และความสามารถในการเกิดผลึก ของพอลิเมอร์ ซึ่งจะทำให้มีลักษณะรูปแบบของผลึกที่แตกต่างกันไป เช่น Spherulite, Axialites, Shish Kebab หรือ Fibril โดยลักษณะที่พบมากที่สุด คือ Spherulite โดยที่การเกิดผลึก (Spherulite) ซึ่งการ เกิดผลึกของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเกิดนิวเคลียส และกระบวนการโตของผลึก

ข. กระบวนการเกิดนิวเคลียส

ผลึกที่เกิดจากการหลอมเหลวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน (Crystallization from Melt) หรือการละลายในสารละลาย (Crystallization from Solution) เมื่อทำให้เย็นตัว สายโซ่ ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่พันกันจะเริ่มวางตัวเป็นระเบียบ และเริ่มเกิดนิวเคลียส หรือขั้นตอน ที่เรียกว่ากระบวนการเกิดนิวเคลียส (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) ที่อุณหภูมิจากการเกิดผลึกดังสมการที่ 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

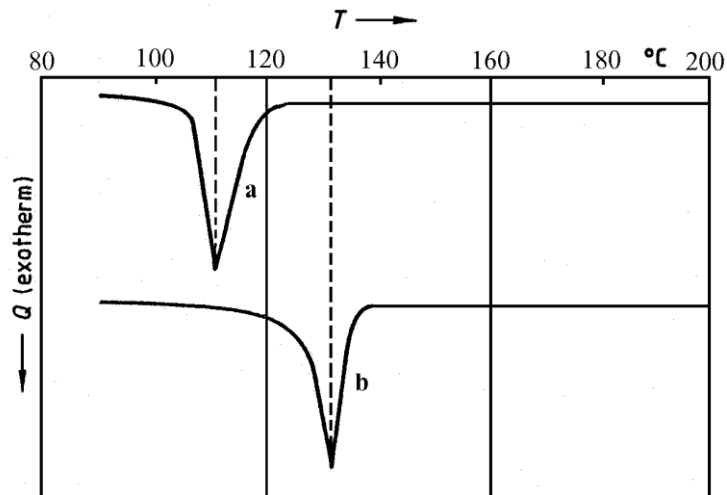
2.5.2 ผลของสารตัวเติมต่อการเกิดผลึก [5]

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 ของพอลิพรอพิลีนไม่เติมสารก่อผลึก และเติม 1% Sodium p-tert.-Butylbenzoate ที่อัตราการเย็นตัว 8 K/min การเกิดผลึกจากเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเติมสารก่อผลึกลงไปจะส่งผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดผลึกของ PP เพิ่มขึ้น



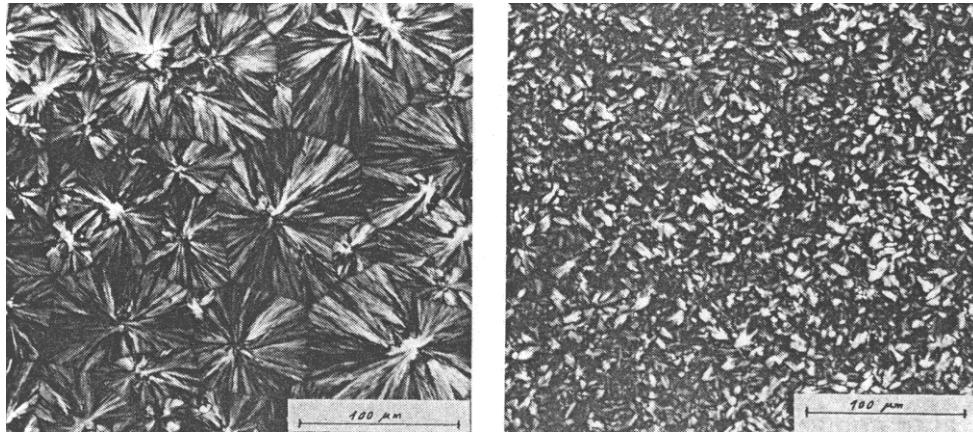
รูปที่ 2.7 แสดงของการเกิดผลึกจากเทคนิค DSC ของพอลิพรอพิลีน (a) ไม่เติมสารก่อผลึก (b) เติม 1% Sodium p-tert.-Butylbenzoate ที่อัตราการเย็นตัว 8 K/min [5]

ข. การศึกษาขนาดของผลึกจากเทคนิค Polarized Optical Microscope

จะเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น และศึกษาอัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ได้ ผลึกที่ได้จากการศึกษาโดย Polarized Optical Microscope จะมีลักษณะเป็น Spherulite ที่มีลักษณะของ Maltese Cross Pattern ภายใต้การตัดกันของแสง Polarized (Cross Polar) เมื่อเติมสารก่อผลึกลงไปจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึกเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.12

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

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



(1)

(2)

รูปที่ 2.8 อิทธิพลของสารก่อผลึกต่อขนาดของ Spherulite ของพอลิพรอพิลีน (1) Spherulite ของพอลิพรอพิลีน (2) Spherulite ของพอลิพรอพิลีนเมื่อเติมสารก่อผลึก [5]

2.5.3 สมบัติที่ต้องการของสารก่อผลึก [5]

สารก่อผลึกที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

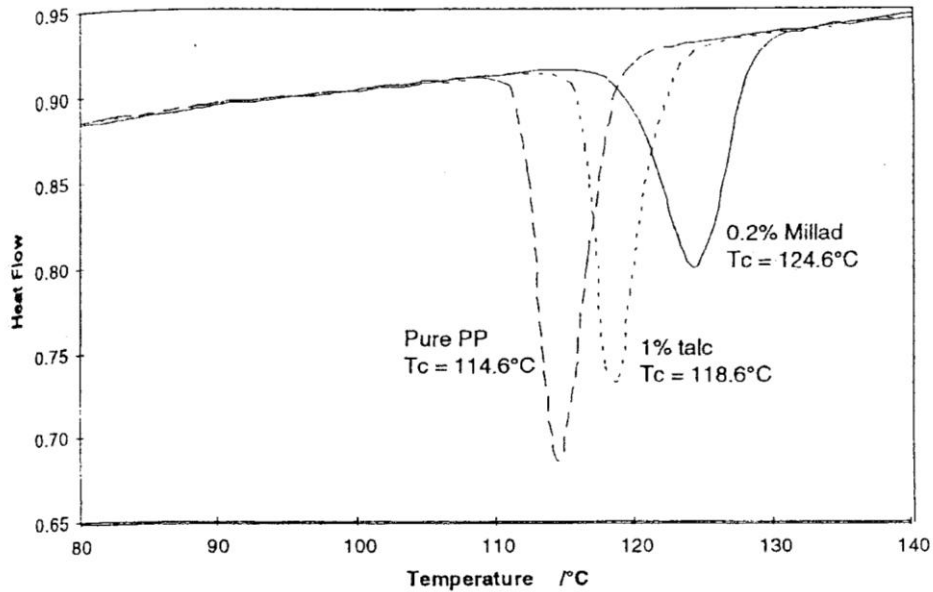
- ก. ถูกทำให้เปียกหรือดูดซับได้โดยพอลิเมอร์
- ข. ไม่ละลายในพอลิเมอร์
- ค. มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าของพอลิเมอร์
- ง. เสถียร ไม่ระเหย และไม่เกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม

ไม่ว่าจะเป็นพอลิเมอร์ออกซิเจน ความชื้น หรือสารเติมแต่งเติมอื่นในกรณีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ผลผลิตที่ได้จะต้องทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ สำหรับสารที่นำมาใช้เป็นสารก่อผลึกอาจเป็นสารอินทรีย์ เช่น ทัลค์ ซิลิกา เคาติน เป็นต้นสารอินทรีย์ เช่น กลีเซอรอล โมโน-หรือพอลิคาร์บอซิลิก ผงสี บางชนิด เป็นต้นพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิเอไมด์ 6.6 หรือ PET สามารถใช้เป็นสารก่อผลึกสำหรับพอลิเอไมด์ 6 ได้

2.5.4 การตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อผลึก [5]

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

รูป 2.9 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของโพลีพรอพิลีนทั้งในกรณีที่ไม่ใส่และใส่สารก่อผลึก (ทัลค์ 1 % และ Millad 0.1 %) ซึ่งจะเห็นได้ว่า T_c ของโพลีพรอพิลีนสูงขึ้นเมื่อใส่สารก่อผลึก (แสดงว่าพอลิเมอร์เกิดผลึกได้เร็วขึ้น)



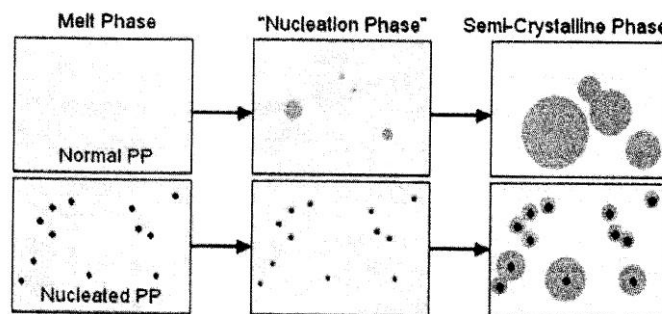
รูปที่ 2.9 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของโพลิโพรพิลีน [5]

โดยทั่วไปแล้วผลจากการใส่สารก่อผลึกในพอลิเมอร์มีดังนี้

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

ข. ศักดิ์ของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้น พอลิเมอร์จะมีความทนแรงดึง โมดูลัสและความแข็งเพิ่มขึ้น

ค. ผลึกสเฟียรูไลที่มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กลง (รูป 2.10) ทำให้แสงสามารถผ่านผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ผลิตภัณฑ์จึงมีความใสมากขึ้น หรือมีความขุ่นลดลง ซึ่งในกรณีที่การใส่สารก่อผลึกทำให้พอลิเมอร์มีความโปร่งใสมากขึ้น จะเรียกสารก่อผลึกว่า สารทำให้ใส (Clarifying Agents)



รูปที่ 2.10 ขนาดและการกระจายขนาดของผลึกในโครงสร้างโมเลกุลของโพลิโพรพิลีน แถวบนไม่ได้ใส่สารก่อผลึก แถวล่างใส่สารก่อผลึก [5]

นอกจากนี้ จากการศึกษาที่โครงสร้างผลึกมีความละเอียดและสม่ำเสมอมากขึ้น จึงช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกและการยึด ฉ. จุดขาดของพอลิเมอร์ด้วย เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวจะช่วยกระจายแรงที่กระทำบนพอลิเมอร์ได้ดี (อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้สารก่อผลึกในบางกรณี อาจทำให้ความทนแรงกระแทกลดลงเล็กน้อย)

2.6 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [5]

2.6.1 ผลของขนาด ปริมาณ และการกระจายตัวของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [5]

ก. โมดูลัส (Modulus)

สารตัวเติมจะเพิ่มโมดูลัสให้กับพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติม เนื่องจากความแข็งของสารตัวเติมมากกว่าพอลิเมอร์ ปริมาณของสารตัวเติมมีผลทำให้โมดูลัสเพิ่มขึ้น อนุภาคของสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวของอนุภาคที่แคบ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสลดลง ขณะที่สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่กว้าง จะทำให้โมดูลัสของพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมนั้นเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของการกระจายตัวของอนุภาคจะพบว่าการรวมตัวของอนุภาค (Agglomerate) อาจทำให้ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนที่มีการรวมตัวกันจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลง Stress และ Strain น้อยกว่า หรือเนื่องจากการมี Interaction ระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ และ Interaction ระหว่างสารตัวเติมเอง ทำให้ค่าโมดูลัสสูงขึ้น

ข. ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ ได้แก่ การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม (Particle packing) ขนาด รูปร่าง การกระจายตัว และการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม สารตัวเติมอาจส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น หรือลดลง โดยทั่วไปขนาดอนุภาคที่เล็ก และการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม รวมไปถึงการกระจายตัวและการยึดเกาะที่ดีของสารตัวเติมภายในการผสมกับพอลิเมอร์ จะทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ในกรณีที่การผสมที่มีความสม่ำเสมอระหว่างอนุภาคสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ไม่ดี จะทำให้ความสามารถในการรับแรงและการยึดตัวของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้ขาดง่าย ความแข็งแรงดึงจึงลดลง

ค. การยืดตัว (Elongation)

ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การยืดตัวของพอลิเมอร์ลดลง โดยที่สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีการยึดเกาะที่ดีกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ (Polymer Matrix) จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงดึง และทำให้การยืดตัวของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

ง. การรับแรงกระแทก (Impact Strength)

สารตัวเติมที่ผสมลงไป ในพอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นแหล่งรวมแรง (Stress Concentrator) โดยมีลักษณะการยืดตัว (Ductility) ที่แตกต่างกันระหว่าง Polymer Matrix กับสารตัวเติม ดังนั้นสารตัวเติมที่มีความแข็ง ค่าโมดูลัสสูง มีการยืดตัวที่ต่ำ จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ

ดังนั้นการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์จึงลดลง ในขณะที่อนุภาคของสารที่นำมาผสม มีความสามารถในการยึดตัวได้สูงกว่า Polymer Matrix เช่นอนุภาคของยาง สามารถปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์นั้นได้ (Impact Modifier) สำหรับสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก และมีการกระจายตัวของอนุภาคที่แคบ จะเกิดการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอ จะช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์

2.6.2 การปรับปรุงผิวของสารตัวเติม [5]

เมื่อทำการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมจะปรากฏลักษณะของการไม่เข้ากัน (Incompatibility) ที่บริเวณผิวสัมผัส (Interface) เนื่องจากพอลิเมอร์และสารตัวเติมจะมีความแตกต่างกันในเรื่องเคมีของพื้นผิว (Surface Chemistry) โดยที่สารตัวเติมมีความเป็นขี้ และมีความ Surface area สูง ทำให้ยากต่อการกระจายตัว และการสัมผัสกับผิว (Wetting) ของพอลิเมอร์ เมื่อสารตัวเติมมีการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความไม่สม่ำเสมอ และการที่สารตัวเติมสัมผัสกับผิวของพอลิเมอร์ไม่ดี จะทำให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ลดลง และลดความชื้นได้ง่าย รวมทั้งเมื่อใช้สารตัวเติมในปริมาณสูง ทำให้ความหนืดในการผสมสูง และไหลได้ยาก จึงมีการเคลือบผิวสารตัวเติมเพื่อให้การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมมีประสิทธิภาพการผสม และสมบัติของพอลิเมอร์ที่ดี การเคลือบผิว หรือการปรับปรุงผิวโดยการใส่สารเคมีที่เรียกว่า Coupling หรือ Wetting Agent จากการเคลือบผิวสารตัวเติมจะช่วยให้อายุการใช้งานของสารตัวเติมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ความหนืดในการผสมลดลง ส่งผลให้เพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ได้ นอกจากนี้สารเคมีประเภท Coupling Agent มีผลให้การยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมดีขึ้น ทำให้การยึดตัว และสมบัติในการรับแรงกระแทกดีขึ้น

ประเภทของสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงผิว

- ก. Silane Coupling Agent
- ข. Titanate Coupling Agent
- ค. Zircoaluminate Coupling Agent
- ง. Reactive Cellulosics
- จ. Hydrophobic Wetting Agent
- ฉ. Fatty Acid Esters
- ช. Chlorinated Paraffins
- ซ. Organosilicons

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

2.7 การบดและการคัดแยกขนาด [6]

2.3.1 การบดหรือการลดขนาดอนุภาค [6]

จะเป็นการให้แรงในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กลง การให้แรงกับอนุภาคของแข็งแบ่งได้เป็น

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

2.7.2 การเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดขนาด [6]

การเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดขนาดขึ้นอยู่กับลักษณะของอนุภาคได้แก่ขนาดรูปร่าง ความแข็ง และการทนต่อความร้อน เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้ในการลดขนาดอนุภาคแบ่งได้เป็น

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

ข. Grinding Media Mill เครื่องมือที่ใช้ลดขนาดประเภทนี้ ภายในของเครื่องมือจะมีตัวกลางเพื่อช่วยในการลดขนาด เช่นลูกบด 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 เช่นอัตราการไหลของอากาศที่ใช้

จ. Cutting Mill เป็นเครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทเส้นใย พิล์ม และยาง หรือในกระบวนการหมุนเวียนของเสียกลับมาใช้ใหม่ เช่นกระดาษและพลาสติก เป็นต้น

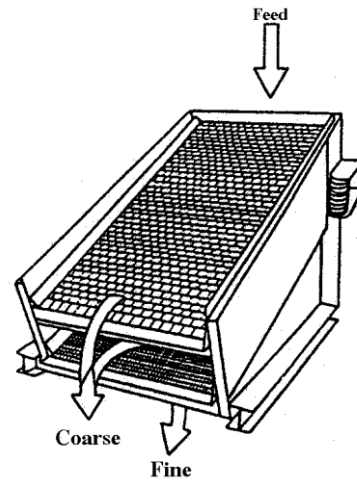
ฉ. Wet Grinding การลดขนาดโดยวิธีนี้จะใช้กับงานลดขนาดในสภาวะปกติไม่ได้ เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงสารพิษ หรืออนุภาคที่สามารถติดไฟได้จากการลดขนาด

2.7.3 การคัดแยกขนาด [6]

การคัดแยกขนาดจะอาศัยความแตกต่างของความละเอียดของอนุภาค ในการแยกอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ เทคนิคที่ใช้ในการแยกขนาดแบ่งได้เป็น

ก. การใช้ตะแกรงร่อน (Screening or Sieving) เป็นกระบวนการที่ให้ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสามารถผ่านตะแกรงที่ใช้เป็นเครื่องมือในการคัดขนาด อนุภาคที่ผ่านได้จะเรียกว่า Undersize ขณะที่อนุภาคที่เหลือด้านบนเรียกว่า Oversize เครื่องมือที่ใช้มีลักษณะเป็นตะแกรงแบบอยู่

กับที่ หรือสั่นได้ เครื่องมือจะถูกออกแบบให้มีความลาดเอียงดังรูปที่ 2.11 ในทางอุตสาหกรรม สามารถคัดขนาดได้ตั้งแต่ 50-12,000 μm

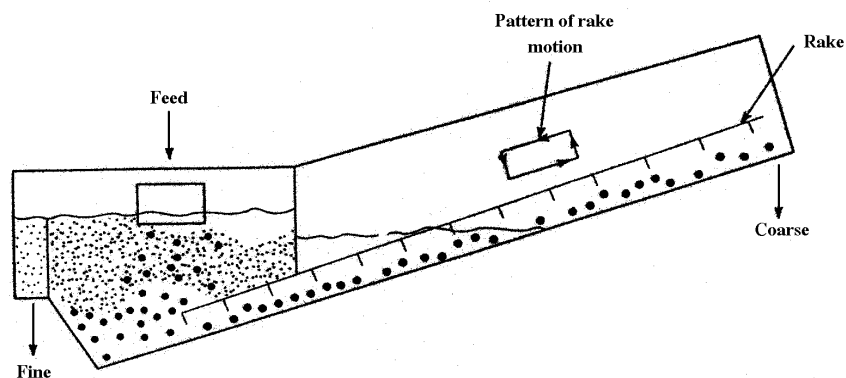


รูปที่ 2.11 ลักษณะของตะแกรงที่ใช้คัดขนาด [6]

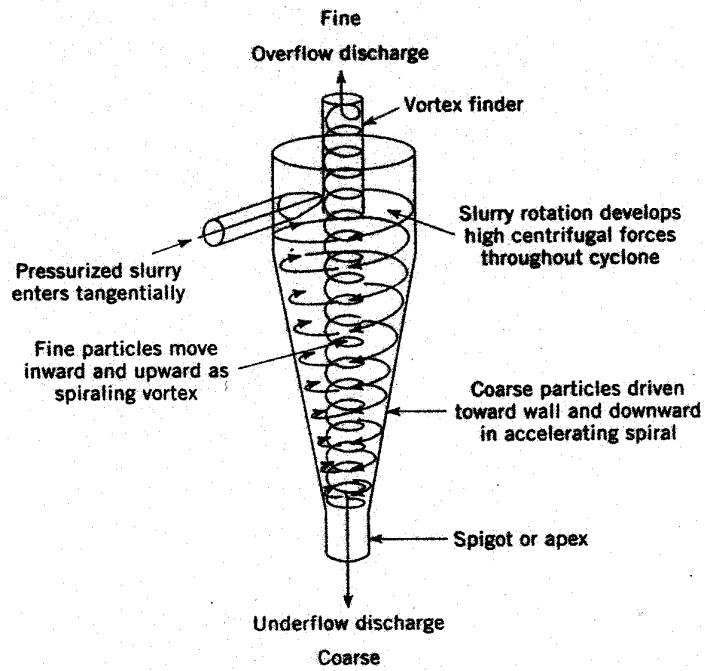
ข. การคัดแยกแบบเปียก (Wet Classification) เครื่องมือในการคัดแยกมีลักษณะดังรูปที่ 2.12 จะประกอบด้วยถังที่มีความลาดเอียงที่ให้นุภาคขนาดเล็ก และน้ำสามารถไหลไปยังส่วนคัดขนาด ขนาดอนุภาคที่คัดได้อยู่ในช่วง 25-150 μm โดยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอนุภาค

ค. Hydrocyclone เป็นเครื่องมือในการคัดแยกอนุภาคโดยอาศัยการคัดแยกแบบเปียก โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง และการหมุนวนของอนุภาค ลักษณะของเครื่องมือดังรูปที่ 2.13 ขนาดอนุภาคที่ได้อยู่ในช่วง 5-30 μm

ง. Centrifuge เป็นการคัดแยกอนุภาคแบบเปียก ขนาดของอนุภาคที่ได้อยู่ในช่วง 5-8 μm ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตนม

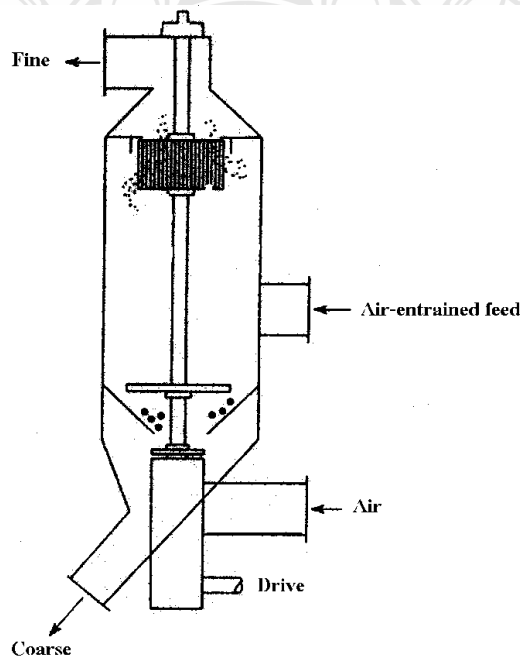


รูปที่ 2.12 เครื่องมือในการคัดแยกแบบเปียก [6]



รูปที่ 2.13 เครื่องมือคัดแยก Hydrocyclone [6]

จ. การคัดขนาดแบบแห้ง (Dry Classification) เป็นเทคนิคที่อาศัยแรงลมในการแยกอนุภาคได้ต่ำกว่า $100 \mu\text{m}$ เครื่องมือจะมีลักษณะเป็นไซโคลนดังรูปที่ 2.14 แรงหมุนจะทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ชนผนังและตกลงไปด้านล่าง โดยที่อนุภาคขนาดเล็กจะไปตามแรงดันของอากาศออกไปทางด้านบนของไซโคลน



รูปที่ 2.14 ไซโคลนในการคัดขนาดแบบแห้ง [6]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและทดลองให้เป็นไปได้อย่างถูกต้อง ซึ่งมีดังนี้

2.8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และ สมบัติของพอลิเอทิลีนที่ผสมกับเปลือกหอยแครง [14]

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเปลือกหอยแครงมาใช้เป็นสารตัวเติม ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติมาทำให้เกิดประโยชน์ โดยนำเปลือกหอยแครงไปบดให้ละเอียดแล้วนำมาผสมกับ LDPE เพื่อศึกษาสารตัวเติมที่ได้จากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ และหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิเอทิลีนที่ผสมกับเปลือกหอยแครง และผลในการเป็นการก่อผลึกสำหรับพอลิเมอร์

จากการทดลองพบว่าส่วนประกอบหลักของเปลือกหอยแครงบดได้แก่ CaCO_3 95 % ซึ่ง CaCO_3 ในเปลือกหอยแครงบดทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม เพื่อช่วยในการลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ และมีลักษณะเป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ใน LDPE โดย carboxylic acid ที่มีอยู่ในเปลือกหอยแครงบด จะช่วยทำให้เปลือกหอยแครงบดมีการกระจายตัว และการยึดเกาะที่ดีกับ LDPE โดยเปลือกหอยแครงบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 36 μm และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ แสดงว่าอนุภาคเปลือกหอยแครงบดมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อผสมระหว่าง LDPE กับเปลือกหอยแครงบด จะได้ค่าโมดูลัสสูงสุดที่ 136 MPa ที่ปริมาณเปลือกหอยแครงบด 30 wt% มีค่าความแข็ง (shore D) สูงสุดที่ 46 ที่ปริมาณเปลือกหอยแครงบด 40 wt% ซึ่งสารตัวเติมเปลือกหอยแครงบดทำให้การยึดตัวที่จุดขาดของ LDPE ลดลง ขณะที่ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากไม่เปลี่ยนแปลง จากการศึกษสมบัติทางความร้อน พบว่าเปลือกหอยแครงบดทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของ LDPE ลดลง และทำให้ LDPE มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของ LDPE ที่ผสมกับเปลือกหอยแครงบดเพิ่มขึ้นด้วย

2.8.2 การศึกษาเส้นใยผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับอะลูมิเนียมฟอยล์นำกลับมาใช้ใหม่ [15]

โครงการนี้เป็นกรนำวัสดุที่เหลือใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมฟอยล์ มาเป็นสารตัวเติมในการผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ด้วยอัตราส่วนผสม 0-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ได้ศึกษาปัจจัยในการผสม 2 ด้าน คือ ด้านปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอะลูมิเนียมฟอยล์ และด้านความเร็วรอบ

จากการทดลองพบว่า อะลูมิเนียมฟอยล์สามารถนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงได้ แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอะลูมิเนียมฟอยล์มีความไม่เข้ากัน ปริมาณอะลูมิเนียมฟอยล์มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เมื่อมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมฟอยล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะผิวหยาบ ความแข็งแรงลดลง โมดูลัสลดลง และการยึดตัว

ลดลง โดยมีอุณหภูมิการหลอมเหลวจะอยู่ในช่วง 130 -140 °C เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของ พอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตและความเร็วรอบไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 115 -116 °C ซึ่งความเร็วรอบไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและการเกิดผลึกแต่มีผลทำให้การบวมตัวของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

2.8.3 การทำให้พอลิพรอพิลีนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยการผสมผงยาง Ultrafine full-Vulcanized (UFPR) และ SBS [16]

งานวิจัยนี้เป็นการทำให้พอลิพรอพิลีนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยการเติม Ultrafine full-Vulcanized Powdered Rubber (UFPR) และ SBS ผสมลงในพอลิพรอพิลีน โดยทำการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอกคู่ (Twin screw extruder) อุณหภูมิที่กระบอกอัดรีด 180-200°C ความเร็วรอบเกลียวหอนอกในการผสม 350 rpm. โดยมีการผสม UFPR และ SBS ในสัดส่วนต่างๆ จากนั้นนำวัสดุผสมที่ได้ไปตัดเป็นเม็ดและฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน จากนั้นนำไปทางสอบสมบัติทางกล ศึกษาโครงสร้าง และศึกษาการก่อผลึก

จากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า พอลิพรอพิลีนที่ผสมยาง UFPR/SBS ลงไป ค่าความแข็งแรงดึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อย การยืดตัวที่จุดขาด, ค่ามอดูลัส, และความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้นสูงขึ้น กว่าพอลิพรอพิลีนบริสุทธิ์ จากการศึกษารูปร่างโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิด Transmission electron microscope (TEM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมยาง UFPR/SBS ลงไป อนุภาคของยาง UFPR/SBS มีการกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของพอลิพรอพิลีน เป็นผลให้พอลิพรอพิลีนผสมที่ได้มีความแข็งแรง และอนุภาคของยาง UFPR/SBS ทำให้เกิดการก่อผลึกขึ้น จากการศึกษาด้านความร้อนโดยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) การเติม UFPR/SBS ทำให้เกิดการก่อผลึกขึ้นในพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้น โดย UFPR ส่งผลในการช่วยให้เกิดการก่อผลึกของพอลิพรอพิลีนมากกว่า SBS จากการเกิดผลึกมากขึ้นส่งผลให้พอลิพรอพิลีนผสมที่ได้ มีความแข็งแรงและความต้านทานความร้อนสูงขึ้น

2.8.4 สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน ของพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมกับผงสังกะสี [23]

งานวิจัยนี้การทดสอบวัสดุผสมระหว่างพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับผงสังกะสีบดละเอียดมีขนาดอนุภาคใหญ่สุด 5 µm ผสมโดยการบดมันขึ้นรูปพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้เป็นแผ่น ใช้เวลาผสม 10 นาที หลังจากนั้นเติมผงสังกะสีลงไป โดยเติมผงสังกะสีตั้งแต่ 0-20% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกลและความร้อนเปรียบเทียบกับพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ได้เติมผงสังกะสี

จากการทดลองพิสูจน์ให้เห็นว่า การเติมผงสังกะสีในพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง สมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้เติมผงสังกะสี โดยมีประเด็นยกเว้น 2 ข้อ มีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง โดยค่าสูงสุดอยู่ที่การเติมผงสังกะสี 4 % และค่าขึงมอดูลัสสูงสุด

อยู่ที่การเติมผงสังกะสี 14 % ความหนาแน่นและความแข็งของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมกับผงสังกะสี สูงขึ้นกว่าที่ไม่ได้เติมผงสังกะสี มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการผสมที่เพิ่มขึ้น ความเสถียรของความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงสังกะสีที่สูงขึ้น การรวมตัวกันของผงสังกะสีในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงส่งผลให้อุณหภูมิการแพร่กระจายความร้อนและนำความร้อนเพิ่มขึ้น และค่าความร้อนจำเพาะลดลง

2.8.5 สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล และ สมบัติทางไฟฟ้า ของการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นเชิงเส้น (LLDP) [24]

งานวิจัยนี้เป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นเชิงเส้น (LLDP) ผสมกับผงทองแดง ซึ่งผงทองแดงมีอนุภาคเล็กกว่า 38 μm ผสมในเครื่อง Brabender Plastograph ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยเติมผงทองแดงในพอลิเมอร์ทั้งสองตั้งแต่ 0-24 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทดสอบทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC และ TGA ทดสอบสมบัติทดสอบทางกล โดยการทดสอบดึงค่าการนำไฟฟ้า และค่าการนำความร้อน

จากการทดลองจะพบว่า การกระจายตัวของอนุภาคผงทองแดงในพอลิเมอร์เทียบกับการก่อตัวของพอลิเมอร์ทั้งสอง ที่ปริมาณเติมผงทองแดงสูงมีการกระจายตัวต่ำ โดยอนุภาคผงทองแดงจะเกาะตัวกันมากที่การเติมปริมาณผงทองแดงสูงขึ้น การผสมทองแดงเข้าไปมีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นเชิงเส้น เล็กน้อย จากการหลอมเหลวผลรวมของพลังงาน (Enthalpy) พบว่าอนุภาคของทองแดงก่อให้เกิดนิวเคลียส ทำให้พอลิเอทิลีนเกิดผลึกของคริสตัลไลน์เพิ่มขึ้น ความเสถียรของอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมผงทองแดงดีกว่าที่ไม่ได้เติมผงทองแดง ส่วนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นเชิงเส้น มีความเสถียรดีขึ้นที่ปริมาณการผสมผงทองแดงต่ำเท่านั้น จากการทดสอบแรงดึงพบว่าสมบัติคล้ายวัสดุผสมทั่วไป ก็จะมีสมบัติทางกลที่ไม่ดี (นอกจากค่า ยั่งมอดุลัส) เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติม อุณหภูมิและการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุผสมมีค่าสูงขึ้นกว่าพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ การนำไฟฟ้าที่ดีของพอลิเมอร์ทั้งสองอยู่ที่ปริมาณการผสม 18.7 %

2.8.6 การศึกษาการสึกหลอ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุผสม ระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีอนุภาคขนาดนาโน และเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ (PPS) [25]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสึกหลอและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุผสม ระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีอนุภาคขนาดนาโน และเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ (PPS) ซึ่งผสมโดยการอัดขึ้นรูปโดยอนุภาคของ CuO มีขนาด 16-32 nm. เส้นใยเสริมแรงเป็นเส้นใยคาร์บอนสั้นๆ (CF) มีขนาด 7 μm และยาว 6 mm. และเส้นใย โพลีอะรามิด (Kevlar) โดยมีสัดส่วนการเติมสารตัวเติมที่แตกต่างต่างกัน ตั้งแต่ 1-4 % และวัสดุเสริมแรงตั้งแต่ 5-15% สำหรับการ

วัดปริมาณการสึกหลอ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน วัดจากวิธีการเคลื่อนที่ไปมาแบบ pin-on-disk พื้นผิวของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการเสียดทานทำจากเหล็กกล้า มีความแข็ง 55-60 HRC และมีความราบเรียบผิว 0.09-0.11 μm ทดสอบโดยให้ผิวชิ้นงานทดสอบเคลื่อนที่เลื่อนไปมาสัมผัสกับผิวเครื่องมือทดสอบด้วยความเร็ว 1 m/s ใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขไม่มีการเคลื่อนที่ในการเสียดสีอย่างคงที่

จากการทดลองพบว่าในส่วนของสารตัวเติม มีการอัตราการสึกหรอต่ำลงที่ วัสดุผสม PPS + 2%CuO และในส่วนของเส้นใยเสริมแรง ที่วัสดุผสม PPS + 10% Kevlar อนุภาคของสารตัวเติม CuO ไม่ส่งผลมากต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ขณะที่ในส่วนของ PPS ที่ผสม เส้นใยเสริมแรง CF ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงครึ่งหนึ่ง อัตราการสึกหลอมีค่าต่ำลงอย่างคงที่เมื่อมีการผสมอนุภาค CuO ขนาดนาโน การผสมเส้นใยเสริมแรง Kevlar เดี่ยวๆ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่เปลี่ยนแปลงมาก CuO ที่เติมลงในพอลิเมอร์ กับ เส้นใย Kevlar ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น แต่การเติมเส้นใยคาร์บอน (CF) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างของผิวเนื้อเยื่อวัสดุผสมโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) สำหรับวัสดุผสมชนิดที่มีความราบเรียบ เนื้อเยื่อจะมีการบีบอัดตัวกันทำให้มีอัตราการสึกหลอต่ำ และจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเยื่อบางๆมีการเกาะตัวกัน ทำให้อัตราการสึกหลอลดลงคงที่



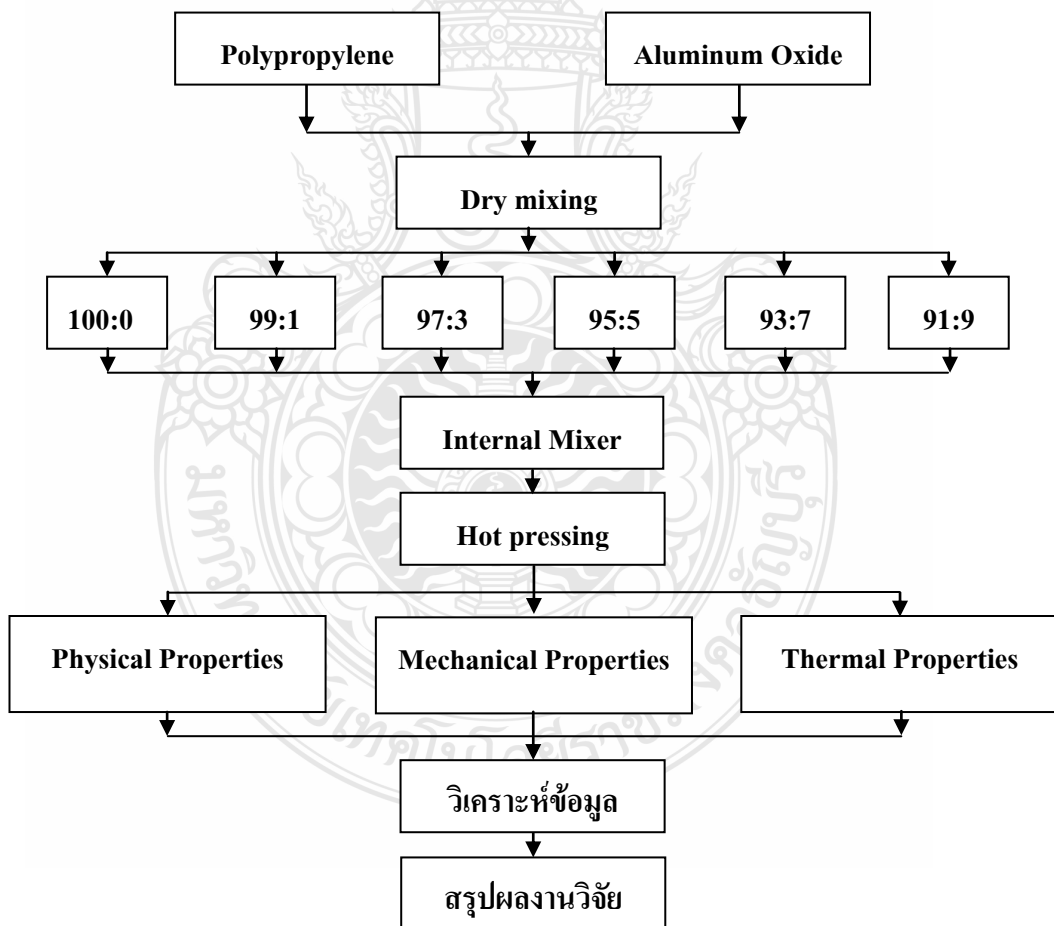
บทที่ 3

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. ซีตะกรันอะลูมิเนียม (Dross)	Al ₂ O ₃	ENKAI THAI

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเม็ดพลาสติก [28]

คุณสมบัติ	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. ปีม	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 ซี้ตะกรันอะลูมิเนียม (อะลูมิเนียมออกไซด์, Dross, Al_2O_3)

ก. ซี้ตะกรันอะลูมิเนียมบดละเอียด

- นำซี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่ได้จากบริษัท (รูป 3.3) มากำจัดสิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอม

- นำซี้ตะกรันอะลูมิเนียมไปแช่น้ำแล้วรินน้ำออก ทำซ้ำเรื่อยๆ จนน้ำที่แช่ซี้ตะกรันอะลูมิเนียมใสไม่ขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.4

- นำซี้ตะกรันอะลูมิเนียมจากข้อ 2 ไปตากแดดให้แห้ง

- นำซี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ไปทุบด้วยค้อนให้มีขนาดเล็ก

- นำซี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่ได้จากข้อ 4 ไปผ่านเครื่องร่อน (Sieve Shaker) (ข้อ 2 ในตารางที่ 3.3) โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 1mm เพื่อนำซี้ตะกรันอะลูมิเนียมไปบดละเอียด

- นำจีตระกรันอะลูมิเนียมที่ได้จากข้อ 5 ไปบดละเอียดโดยใช้เครื่องบดลดขนาดด้วยลูกบด (Ball Mill) (ข้อ 3 ในตารางที่ 3.3) ใช้เวลาในการบดประมาณ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 3.5

- นำจีตระกรันอะลูมิเนียมบดละเอียดจากข้อ 6 ไปคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 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

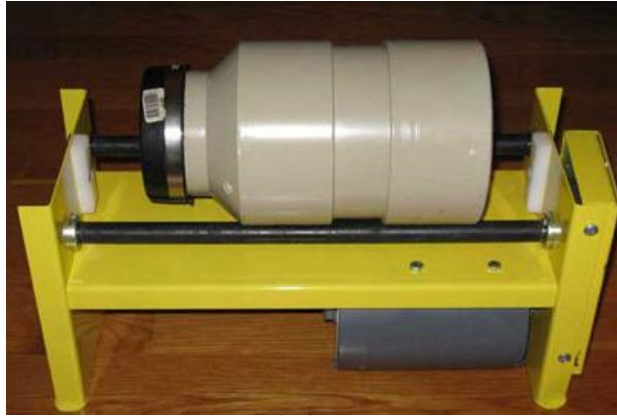
- เก็บจีตระกรันอะลูมิเนียมบดละเอียดที่ได้ไว้ในกล่องพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จีตระกรันอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัดขนาด



รูปที่ 3.3 จีตระกรันอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.4 การล้างทำความสะอาดจีตระกรันอะลูมิเนียม



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 จี้ตระกรันอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัดขนาด

3.3.2 การวิเคราะห์สารตัวเติมอะลูมิเนียมออกไซด์บดละเอียด

ก. การศึกษาส่วนประกอบทางเคมี

วิเคราะห์โครงสร้างส่วนประกอบทางเคมีของจี้ตระกรันอะลูมิเนียมจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (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

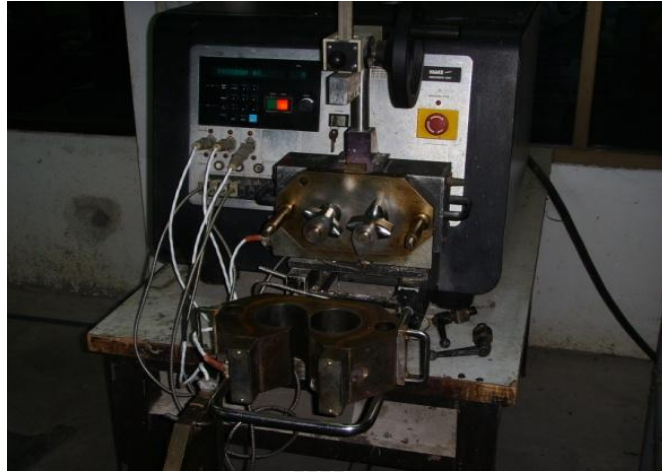
ข. การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของสารตัวเติม

ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของซีตตระกรันอะลูมิเนียมบด (Al_2O_3) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง ด้วยเครื่อง Mastersizer S (ข้อ 11 ในตารางที่ 3.3) โดยอาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนของแสง ใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมครอน เมื่อมีอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางผ่านลำแสงชั่วระยะเวลาหนึ่ง โดยการใช้สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนกลับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค การใช้ตัวกรองแสง เลนส์ และตัวตรวจจับทางแสง ร่วมกับคอมพิวเตอร์ ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาค [23]

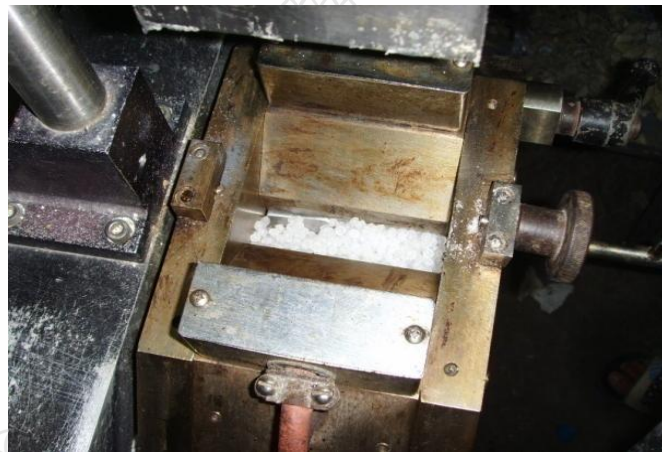
3.4 การผสมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทธิลีน และพอลิพรอพิลีน กับสารตัวเติม

3.4.1 การผสมในเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer)

นำพอลิเมอร์ได้แก่พอลิพรอพิลีนผสมกับสารตัวเติมซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดละเอียด (Al_2O_3) ผสมกันในเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ดังแสดงรูปเครื่องผสมภายในที่รูป 3.10 ที่อุณหภูมิการผสม 220 °C รอบการผสม 40 รอบต่อนาที ใช้เวลาการผสม 5 นาที โดยใช้สัดส่วนการผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่ 1, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ที่ผสมที่ได้จากเครื่องผสมภายใน จะถูกทำให้เย็นตัวในอากาศ และทำการตัดเป็นเม็ดโดยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบในเตาอบ (ข้อ 8 ในตารางที่ 3.3) เพื่อกำจัดความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูป โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ นำเม็ดพอลิพรอพิลีนใส่ในเครื่องผสมภายในที่ตั้งอุณหภูมิและความเร็วรอบการผสมไว้แล้วดังรูปที่ 3.11 จากนั้นเติมซีตตระกรันอะลูมิเนียมลงไปผสมกับพอลิพรอพิลีนในเครื่องผสมภายใน ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นรอให้พอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมผสมกันในเครื่องเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบ 5 นาที เปิดฝานำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกจากเครื่องผสมภายใน ดังแสดงในรูป 3.13 จากนั้นรอให้เย็นตัวในอากาศแล้วนำไปตัดให้เป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ดังแสดงในรูป 3.14 เมื่อผ่านจากเครื่องตัดพลาสติกจะได้เม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียม ดังแสดงรูปเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่สัดส่วนต่างๆ จากการผ่านการผลิตในเครื่องผสมภายในแล้วตัดเป็นเม็ด ดังในรูป 3.15, 3.16, 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.10 เครื่องผสมภายใน (Internal Mixer)



รูปที่ 3.11 ใส้เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนลงในเครื่องผสมภายใน



รูปที่ 3.12 ใส่ซีตตระกรันอะลูมิเนียมบดลงไปผสมกับพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 3.13 วัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับจี้ตระกรันอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.14 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก



รูป 3.15 พอลิพรอพิลีน 100% จากการผสมในเครื่องผสมภายใน



รูปที่ 3.16 พอลิพรอพิลีนที่ผสมจีตระกรันอลูมิเนียม 1 wt%



รูปที่ 3.17 พอลิพรอพิลีนที่ผสมจีตระกรันอลูมิเนียม 5 wt%

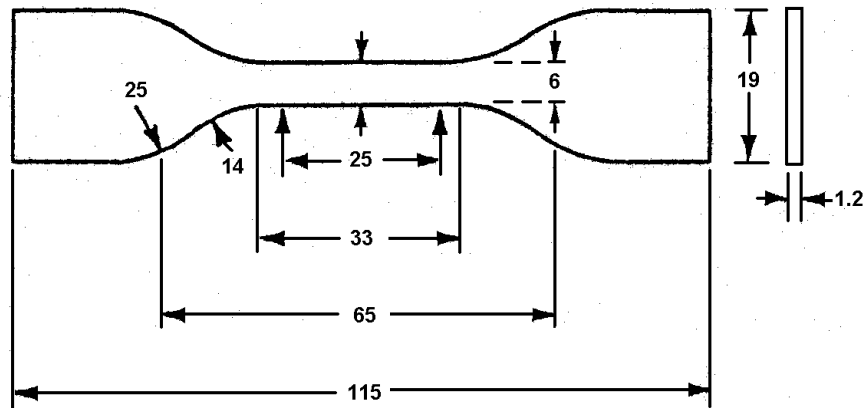


รูปที่ 3.18 พอลิพรอพิลีนที่ผสมจีตระกรันอลูมิเนียม 7 wt%

3.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

ก. การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ผสมได้ไปขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปร้อน (Compression Molding) โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV [11] ดังรูปที่ 3.19 ใช้แม่พิมพ์รูปดัมเบลในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.20 ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ดังรูปที่ 3.21 (ข้อ 9 ในตารางที่ 3.3) อุณหภูมิในการขึ้นรูป 170 °C ที่แรงดัน 10 ดัน 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



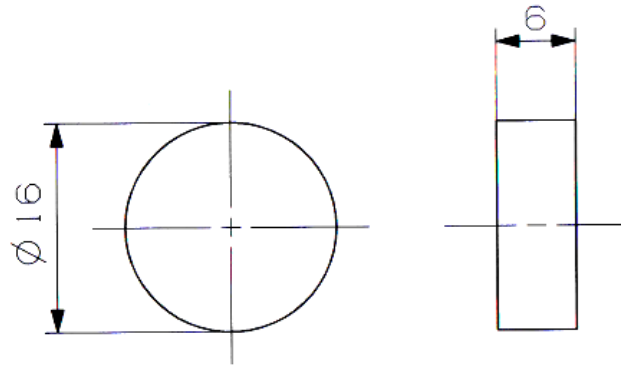
รูปที่ 3.21 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV

ข. การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบความเสียดทาน (Abrasion Testing)

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



รูปที่ 3.23 ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบความเสียดทานตาม DIN 53516



รูปที่ 3.24 แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานทดสอบความเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 53516

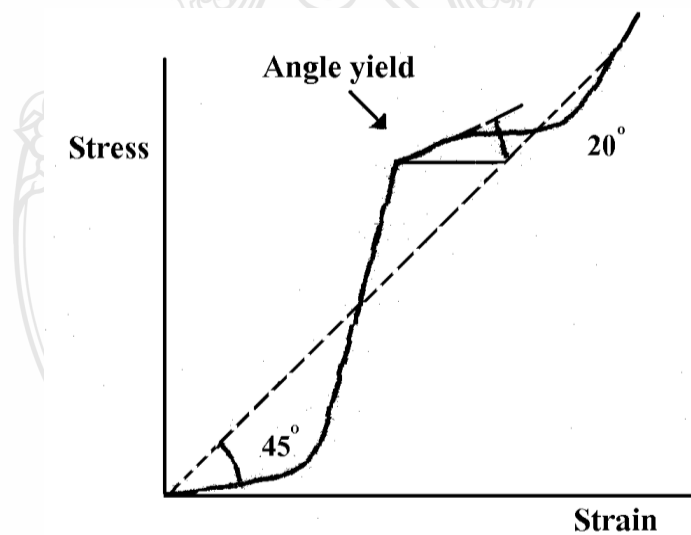
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) [11]

ทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 จากชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบล โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester) ดังรูปที่ 3.28 (ข้อ 10 ในตารางที่ 3.3) ที่โหลดเซลล์ (Load cell) 100 N ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min ดังชิ้นงานขนาด 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)

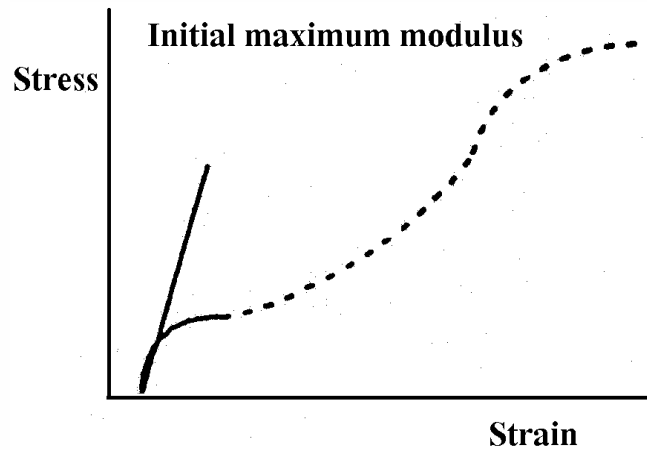
สามารถคำนวณหาความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก โดยใช้ Angle Yield ในการกำหนดจุดยืด (Yield Point) โดยที่มุมยืด (Angle Yield) เกิดขึ้นจากการที่ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดมีลักษณะทำมุมกับแนวเส้นตรงดังรูปที่ 3.26 และเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากที่ได้จากการกำหนดจุดมุมยืด (Angle Yield) มีค่าเท่ากับความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังนั้นผลการทดลองจึงใช้ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ที่ได้จากมุมยืด (Angle Yield)



รูปที่ 3.26 ลักษณะของมุมยืดที่ใช้กำหนดจุดความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก [11]

ข. มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

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



รูปที่ 3.27 ลักษณะของกราฟที่ใช้ในการคำนวณหา Initial Maximum Modulus [11]

ค. เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

% การยืดตัวที่จุดขาดได้จากการคำนวณ โดยซอฟต์แวร์ของเครื่องทดสอบแรงดึง โดยกำหนด Break Strain เป็นจุดที่ขึ้นงานขาด



รูปที่ 3.28 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.29 การทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.30 ชิ้นงานทดสอบจากการทดสอบแรงดึง

3.5.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

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

การทดสอบแบบ Shore Durometer ใช้หัวกดชุบแข็ง สปริงที่ได้ปรับค่าอย่างถูกต้อง ความลึกของหัวกด และแผ่นกด หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกดและมีระยะยึดตัว 2.5 มม. จากผิวของฐาน ตำแหน่งระยะยึดตัวเต็มที่จะมีชี้แสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแบบติดผิวหน้า ฐานกด 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 หรือการทดสอบความแข็งร็อกเวลล์ ทั้งสองวิธีวัดความต้านทานของพลาสติกต่อรอยกด ทั้งสองสเกลให้ค่าความแข็งตามหลักการไม่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและคุณลักษณะพื้นฐาน ความแข็ง Shore A หรือ D เป็นวิธีที่นิยมใช้ สำหรับยาง อีลาสโตเมอร์ และปกติใช้กับพลาสติกอ่อน เช่น พอลิโอฟีน ฟลูออโรพอลิเมอร์ และไวนิล Shore A ใช้สำหรับยางอ่อน ในขณะที่ Shore D ใช้สำหรับยางที่แข็งกว่า ความแข็ง Shore A คือค่าความแข็งสัมพัทธ์ของวัสดุยืดหยุ่น เช่น ยาง หรือพลาสติกอ่อน สามารถที่จะหาได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Shore A Durometer เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางและพลาสติก การอ่านค่าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นเวลาการกดบางครั้งจะถูกรายงานร่วมกับค่าความแข็ง

โดยทำการวัดความแข็งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตะกัณ อะลูมิเนียม 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



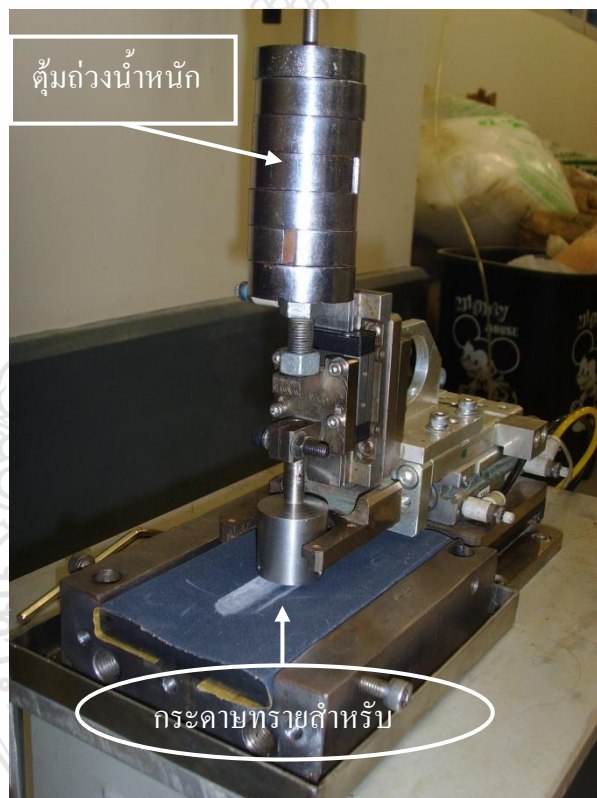
รูปที่ 3.31 เครื่องทดสอบความแข็งชอร์ดูโรมิเตอร์แบบสเกลดี



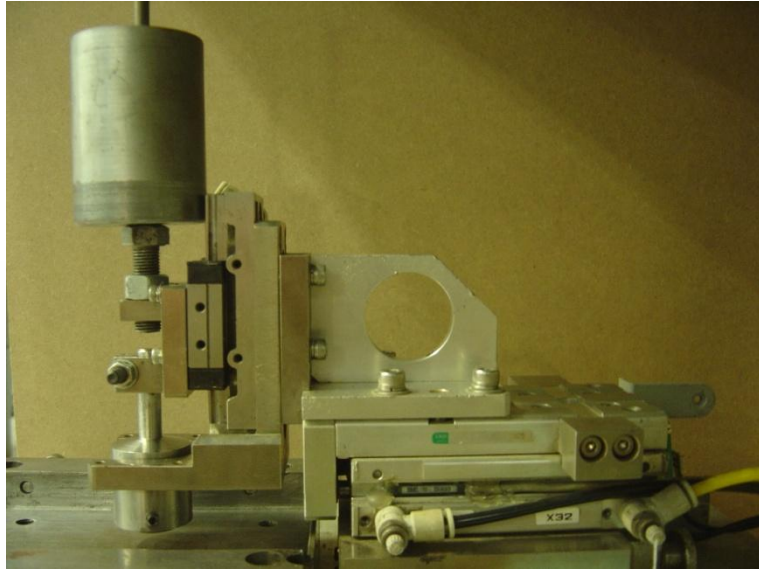
รูปที่ 3.32 การวัดค่าความแข็ง

3.5.3 การทดสอบความเสียดทาน (Abrasion Testing)

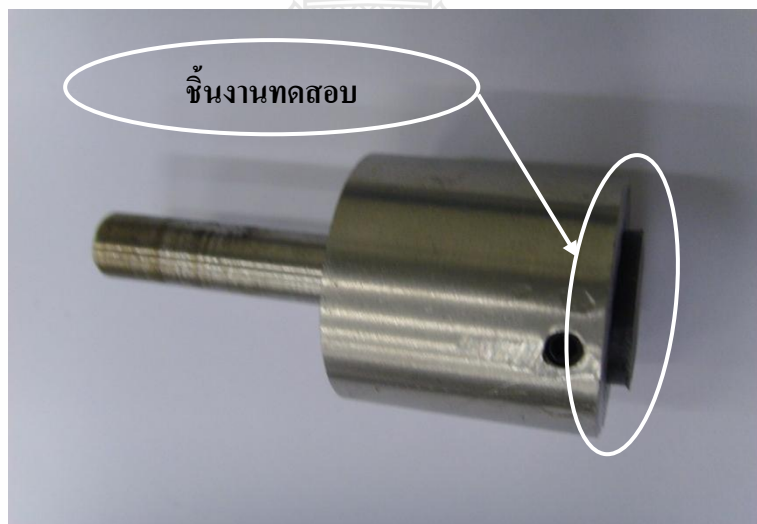
ในการทดสอบการสึกหรอหรือผู้วิจัยได้จัดสร้างทดสอบการเสียดทาน โดยมีลักษณะเครื่องดังรูป 3.33 และ 3.34 (ข้อ 15 ในตารางที่ 3.3) เพื่อทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่เตรียมได้กับชิ้นงานที่เป็นพอลิพรอพิลีน โดยใช้เปรียบในงานวิจัยนี้โดยเฉพาะ โดยจะทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยนำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมได้ไปใส่ในแป้นจับยึดชิ้นงาน ดังในรูป 3.35 โดยผิวหน้าชิ้นงานจะถูกวางบนกระดาษทราย ซึ่งบนแป้นจับชิ้นงานจะมีแกนเหล็กสำหรับใส่ตุ้มถ่วงน้ำหนักเพื่อกดทับชิ้นงาน จากนั้นจะกดสวิทช์ให้เครื่องทำงาน โดยเครื่องจะเคลื่อนที่ เติมน้ำ – ถอยหลัง ด้วยระบบนิวเมติก โดยไม่ยกชิ้นงานในจังหวะถอยกลับ โดยวิเคราะห์ความเสียดทานจากน้ำหนักที่หายไป จำนวนทดสอบ 400 รอบใช้น้ำหนักกดทับ 20N ความเร็วรอบ 1 รอบ/วินาที ระยะชัก 500 mm. กระดาษทรายสำหรับขัด เบอร์ 600



รูปที่ 3.33 เครื่องทดสอบความเสียดทาน



รูปที่ 3.34 เครื่องทดสอบความเสียดทาน



รูปที่ 3.35 การจับชิ้นงานทดสอบความเสียดทาน

3.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนจากเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ จากเทคนิค DSC โดยเครื่อง Perkin Elmer DSC 7 (ข้อ 13 ในตารางที่ 3.2) ตัดชิ้นงานตัวอย่าง ประมาณ 10 mg ใส่ลงในภาชนะทดสอบที่ทำจากอะลูมิเนียม (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 [5]

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

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]

3.7 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ โดยศึกษาลักษณะของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมขึ้นที่ตะกั่วอะลูมิเนียม และศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมบนโครงสร้างของพอลิเมอร์ (Polymer matrix) จากตัวอย่างชิ้นงานที่หักในไนโตรเจนเหลว และทำการเคลือบผิวด้วยทองบนที่ภาพบริเวณรอยหักของวัสดุผสม (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 สารตัวเติมซีตกรันอะลูมิเนียม (Dross, Al_2O_3)

4.1.1 การบดและคัดแยกขนาดซีตกรันอะลูมิเนียม

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

โดยขนาดของซีตกรันอะลูมิเนียมบดที่ได้จากเครื่องบดลดขนาดด้วยลูกบดสามารถคัดขนาดได้จากตะแกรงร่อน (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 ($75\mu m$) จากการทดลองเลือกขนาดซีตกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในการผสมในพอลิพรอพิลีนเบื้องต้น (ภาคผนวก ก หัวข้อที่ 3 การเลือกขนาดอนุภาคซีตกรันอะลูมิเนียม) พบว่าซีตกรันอะลูมิเนียมขนาด 200 เมช ($75\mu m$) ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่สามารถคัดขนาดได้ โดยมีค่าการทดสอบแรงดึงดีที่สุด ทางผู้วิจัยจึงใช้ซีตกรันอะลูมิเนียมขนาด $75\mu m$ ใช้ในการทดลองอย่างละเอียดต่อไป

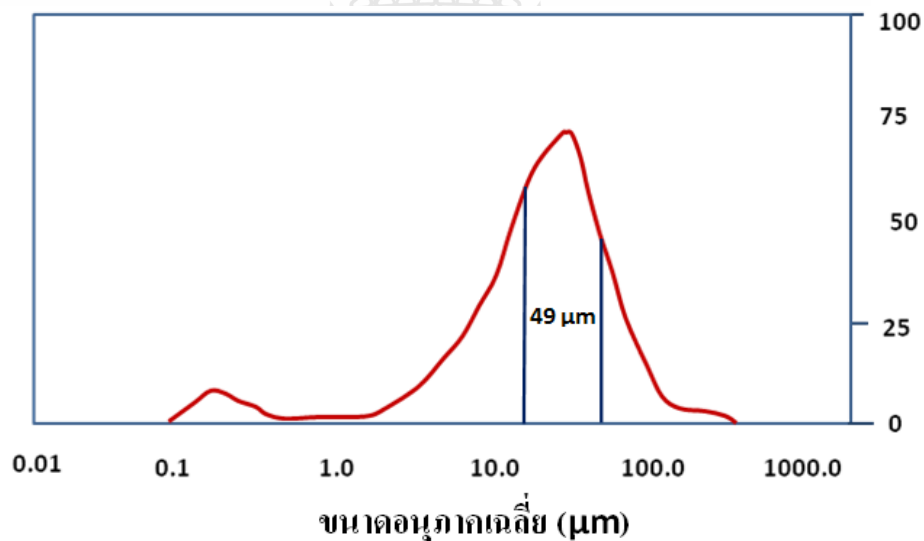
จากการคัดขนาด ซีตกรันอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่า 200 เมช มีอนุภาคเป็นฝุ่นผงเกือบทั้งหมด ซึ่งฝุ่นผงเหล่านี้ละลายไปกับน้ำในขั้นตอนการล้างทำความสะอาด โดยซีตกรันอะลูมิเนียมที่เตรียมได้มีเป็นฝุ่นผงสีเทาดำ



รูปที่ 4.1 ซีตกรันอะลูมิเนียมขนาด $75\mu m$ ที่ได้จากการบดและคัดขนาด

4.1.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซีตระกูลนอะลูมิเนียม

นำซีตระกูลนอะลูมิเนียมที่ได้จากการบดและคัดแยกขนาดจากข้อ 4.1 มาทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซีตระกูลนอะลูมิเนียม โดยนำซีตระกูลนอะลูมิเนียมที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ขนาดด้วยเครื่อง มาสเตอร์ไซส์เซอร์ เอส (Mastersizer S) จากการวิเคราะห์ของเครื่องพบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซีตระกูลนอะลูมิเนียมบดอยู่ที่ประมาณ 49 μm และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดังรูปที่ 4.2 จากรูปพบว่าขนาดอนุภาคของซีตระกูลนอะลูมิเนียมบดมีการกระจายตัวในช่วงแคบ ซึ่งขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเดิมมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ด้วย โดยที่สารตัวเดิมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ ส่งผลให้มีความหนืดในการผสมสูงกว่าสารตัวเดิมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ หรือมีการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงกว้าง ผลการทดลองที่แสดงนี้มีผลการทดลองคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [14] ว่าสารตัวเดิมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ ส่งผลให้มีความหนืดในการผสมสูงกว่าสารตัวเดิมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

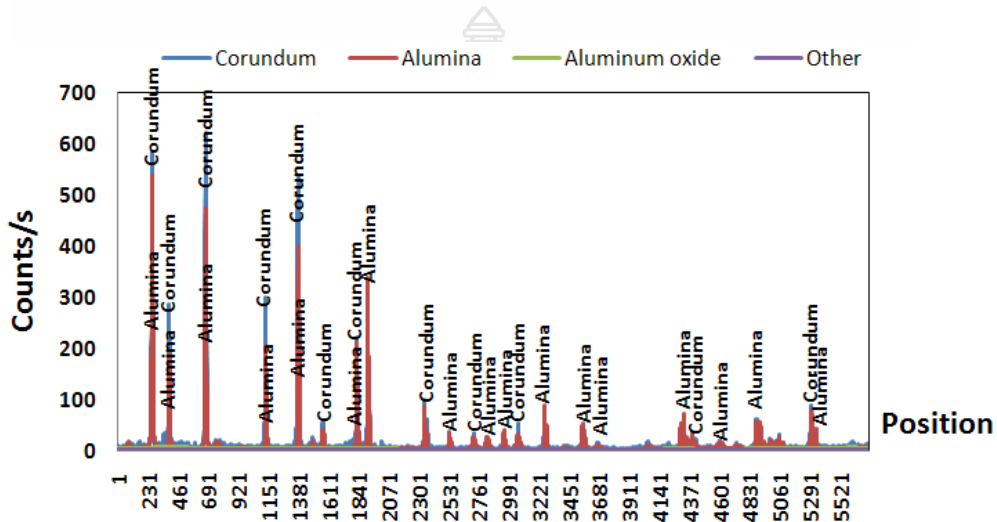


รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซีตระกูลนอะลูมิเนียมบดจากเครื่องมาสเตอร์ไซส์เซอร์ เอส

4.1.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของซีตระกูลนอะลูมิเนียม

นำซีตระกูลนอะลูมิเนียมที่บดและคัดขนาดจากตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช มาทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของซีตระกูลนอะลูมิเนียม โดยวิเคราะห์จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) จากการวิเคราะห์พบว่าส่วนประกอบหลักของซีตระกูลนอะลูมิเนียมที่ใช้ทดลองนี้มีส่วนประกอบเกือบทั้งหมดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งอะลูมิเนียมออกไซด์ที่พบอยู่ในรูปของคอร์ันดัม

(Corundum) และอลูมินา (Alumina) 77.9% และมีธาตุอื่น เช่น สังกะสี, ซิลิกอน, แคลเซียม, ทองแดง, ลิเทียม, ออกไซด์ของเหล็ก, โปแทสเซียม ผสมอยู่เล็กน้อย (ตารางที่ ข-9 ในภาคผนวก ข) ระบุที่ 4.3 เป็นค่าระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก (d-spacing) ที่ค่าความสัมพัทธ์ของความเข้มข้นพลังงานที่สูงที่สุด (Relative intensity) 3 พีค (Corundum, Alumina, Aluminum oxide) เทียบกับข้อมูลมาตรฐาน Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDF) ของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีหลักของซีตตระกรันอะลูมิเนียม (Dross)

4.2 อิทธิพลของปริมาณซีตตระกรันอะลูมิเนียมที่มีผลต่อ สมบัติทางกายภาพ

4.2.1 ลักษณะการผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียม

ก. ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสม

จากการทดลองผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตตระกรันอะลูมิเนียมเบื้องต้นด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวนอนเดี่ยว เพื่อหาช่วงการผสมที่เหมาะสม โดยสุ่มเลือกการผสมซีตตระกรันอะลูมิเนียมใน พอลิพรอพิลีน ที่ 10, 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าช่วงที่เหมาะสมอยู่ในช่วงที่ผสมซีตตระกรัน อะลูมิเนียมไม่เกิน 10 % (ภาคผนวก ก หัวข้อที่ 2 การเลือกช่วงการผสม) สอดคล้องกับ รศ.อรอุษา สร วารี [2] ว่าวัสดุประเภทสารเสริมแรงหรือวัสดุที่มีความแข็งจะนำมาใช้ผสมในพอลิเมอร์ในปริมาณที่ น้อย เพราะสารเสริมแรงเหล่านั้นจะทำให้สมบัติในการยึดตัวของพอลิเมอร์ลดลงอย่างมาก จึงควร ผสมวัสดุประเภทสารเสริมแรงเพียงเล็กน้อยเพื่อคงความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์ไว้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการเติมวัสดุที่มีความแข็งกว่าพอลิเมอร์ลงในพอลิเมอร์ เช่น สุภาภรณ์ ทุม สอน [14] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, ผ.ศ.ดร.สมนึก สังข์หนู [15] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, Mihai Rusu Et.al [23] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และ A.S. Luyt Et.al [24] ที่มีการผสม

ผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาพบว่าเมื่อมีการผสมวัสดุที่มีความแข็งในพอลิเมอร์ความสามารถในการยืดตัวจะลดลง โดยสัดส่วนที่มีความสามารถในการยืดตัวมากที่สุดคือสัดส่วนที่มีการผสมวัสดุลงในพอลิเมอร์น้อยที่สุด

จากการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตระกรันอะลูมิเนียมบดโดยใช้เครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ซีตระกรันอะลูมิเนียมส่งผลให้พอลิพรอพิลีนมีสีเข้มขึ้นเป็นสีเทาคลายกับสีของซีตระกรันอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.4 ลักษณะสีพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสีเข้มขึ้นเมื่อปริมาณซีตระกรันอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณการผสมซีตระกรันอะลูมิเนียม 3, 5, 7, และ 9% พอลิเมอร์ผสมนี้มีสีเข้มมากคล้ายกัน แต่เมื่อมองผ่านแสง พอลิเมอร์ผสมที่ซีตระกรันอะลูมิเนียม 9% มีความโปร่งแสงน้อยที่สุด ตามด้วยพอลิเมอร์ผสมที่ซีตระกรันอะลูมิเนียม 7, 5, และ 3 %



รูปที่ 4.4 ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณการผสมที่สัดส่วนต่างๆ

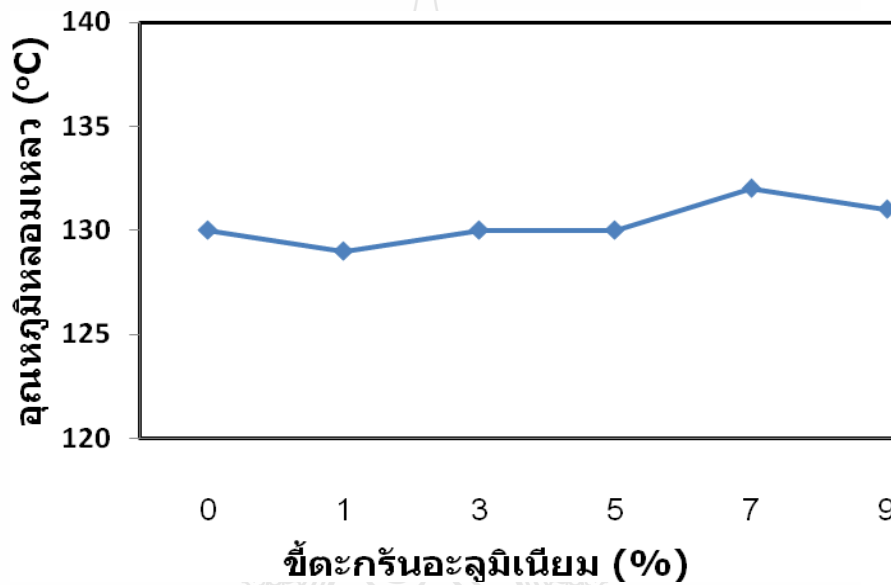
จากการผสมในเครื่องผสมภายใน พอลิพรอพิลีนกับซีตระกรันอะลูมิเนียมถูกหมุนวนอยู่ตลอดเวลาด้วยใบกวนทั้งสองใบของเครื่อง และอนุภาคของซีตระกรันอะลูมิเนียมมีขนาดเล็ก อนุภาคของซีตระกรันอะลูมิเนียมจึงมีการกระจายตัวไปทั่วในเนื้อของพอลิพรอพิลีนดี ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสีสม่ำเสมอและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

4.2.2 อิทธิพลของซีตระกรันอะลูมิเนียมต่อสมบัติความร้อน

ก. อุณหภูมิหลอมเหลว

จากการทดสอบสมบัติทางด้านความร้อนของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสารตัวเติมซีตระกรันอะลูมิเนียมจากเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ในช่วงระหว่าง 129 -132°C โดยซีตระกรันอะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวนี้นี้ ซีตระกรันอะลูมิเนียมจึงไม่เกิดการหลอมเหลว มีเพียงแต่พอลิพรอพิลีน

เท่านั้นที่เกิดการหลอมเหลว ผลการทดลองที่ได้นี้มีผลการทดลองคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [14] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, ผ.ศ.ดร.สมนึก สังข์หนู [15] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอสเฟตลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และ Mihai Rusu Et.al [23] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวที่เกิดขึ้นเป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์เท่านั้น

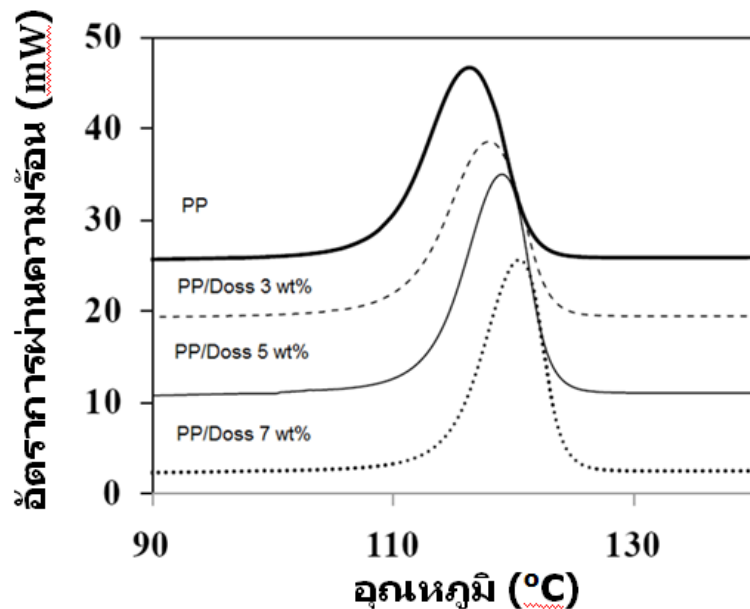


รูปที่ 4.5 อุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตระกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

ข. เกิดผลึกของพอลิเมอร์

ในการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) จากเทคนิค DSC พบว่า T_c ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตระกรันอะลูมิเนียม มีค่าสูงกว่า T_c ของ พอลิพรอพิลีน ดังรูปที่ 4.6 ขณะที่อัตราการเกิดผลึกสูงขึ้นแต่ไม่ต่างกันมากนัก โดยที่พอลิพรอพิลีนที่ผสมขี้ตระกรันอะลูมิเนียมจะมีการเกิดผลึกมากที่สุดคือ 36% ส่วนพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมขี้ตระกรันอะลูมิเนียมจะมีการเกิดผลึกอยู่ที่ 29.1% (ตารางที่ ข-3 ในภาคผนวก ข.) ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้แสดงว่าขี้ตระกรันอะลูมิเนียมบดส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดผลึกได้ดีกว่า และจากค่า T_c ที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับขี้ตระกรันอะลูมิเนียมบด ช่วยส่งผลในการลดเวลาในกระบวนการผลิตได้ เช่น กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด ผลการทดลองที่ได้นี้มีผลการทดลองคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [14] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าสารตัวเติมไม่มีผลต่อการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แต่สารตัวเติมส่งผลทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกิดผลึกเพิ่มขึ้น และคล้ายกับงานวิจัยของ ผ.ศ.ดร.สมนึก สังข์หนู [15] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอสเฟตลงในพอลิเอทิลีน

ชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์สูงขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมฟอยล์ ทำให้พอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกิดผลึกได้มากขึ้น ส่งผลให้มีความเป็นผลึกเพิ่ม



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตระกรันอะลูมิเนียมสัดส่วนต่างๆ

4.3 อิทธิพลของปริมาณซีตระกรันอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกล

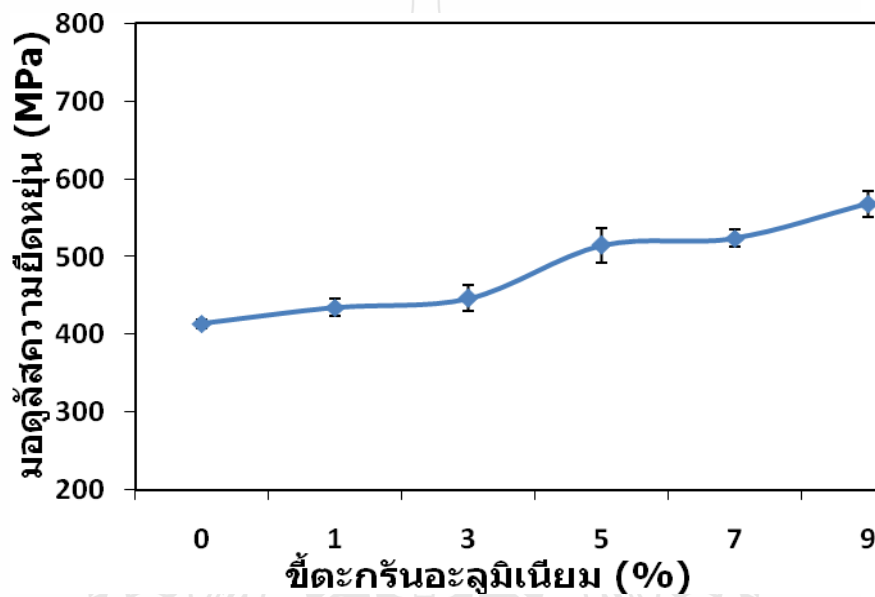
4.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

ในการทดสอบแรงดึงทดสอบ โดยนำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ของบริษัท Monsanto / T2000 ซึ่งมีวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงต่อไปนี้

ก. โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

ที่ปริมาณการผสมสารตัวเติม 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 wt% พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซีตระกรันอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมมีค่าโมดูลัสที่มากกว่าพอลิพรอพิลีน จึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสารตัวเติมเพิ่มขึ้น โดยพอลิพรอพิลีนที่ปริมาณการผสมซีตระกรันอะลูมิเนียมบด 1 และ 3 wt% ค่าโมดูลัสสูงขึ้นไปกว่า พอลิพรอพิลีน ที่ไม่ได้ผสมซีตระกรันอะลูมิเนียมเพียงเล็กน้อย แต่ที่ปริมาณการผสมซีตระกรันอะลูมิเนียมบด 5, 7, และ 9 wt% ค่าโมดูลัสสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.7 โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีค่าสูงสุด อยู่ที่พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตระกรันอะลูมิเนียม 9 wt% มีค่าเท่ากับ 568 Mpa สูงกว่าค่าพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตระกรันอะลูมิเนียมถึง 154 Mpa จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทุมสอน [14] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครง

ลงในพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณการผสมเปลือกหอยแครงบดที่สูงขึ้น, Mihai Rusu Et.al [23] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณการผสมผงสังกะสีที่สูงขึ้น และ A.S. Luyt Et.al [24] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทธิลีนเชิงเส้นพบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณการผสมผงทองแดงที่สูงขึ้น แต่ขัดแย้งกับ ผ.ศ.ดร.สมนึก ตั้งษ์หนู [15] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงลดลงเมื่อผสมกับอะลูมิเนียมฟอยล์ เนื่องจากพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอะลูมิเนียมฟอยล์มีความไม่เข้ากัน ส่งผลให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง

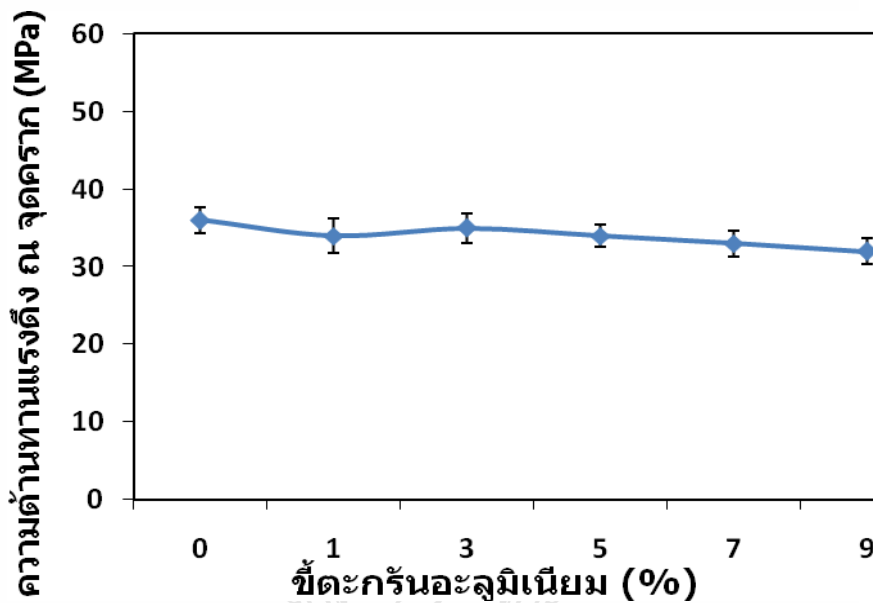


รูปที่ 4.7 มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0-9 wt%

ข. ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)

พอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียมบด 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 ของพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมจะมีค่าสูงสุดคือ 36.06 Mpa ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม 9 wt% ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากต่ำสุด อยู่ที่เพียง 3.94 Mpa ดังแสดงในรูป 4.8 จากผลการ

ทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาพรณีย์ ทุมสอน [14] ที่มีการผสมเปลือกหอยเคแรงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, Mihai Rusu Et.al [23] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และ A.S. Luyt Et.al [24] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลง

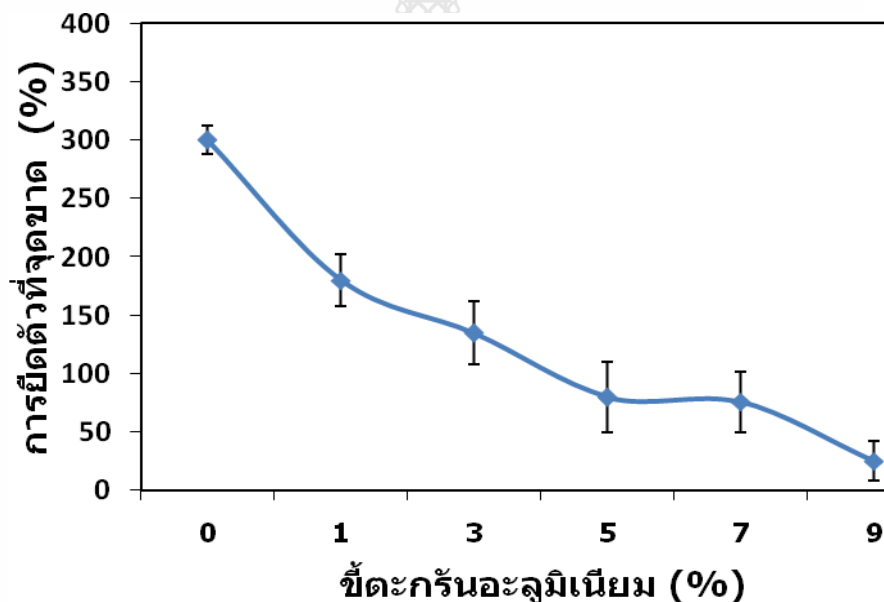


รูปที่ 4.8 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

ค. เปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

จากการทดสอบการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีน พบว่าเมื่อปริมาณขี้ตะกรันอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนลดลง เนื่องจากการนำสารตัวเติมที่แข็งมาผสมกับพอลิเมอร์ โดยที่สารตัวเติมเป็นจุดรวมของความเครียด (Stress Concentrator) เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีจุดรวมของความเครียดมากขึ้น ทำให้พอลิพรอพิลีนที่ผสมกับสารตัวเติมมีความสามารถในการยืดตัวลดลง และสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสความยืดหยุ่น โดยที่มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลงโดยพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมจะมีเปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาดสูงสุดคือ 299.88% เมื่อผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมลงไป 1 wt% จะมีเปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 180.42 wt% เมื่อผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมลงไป 3 wt% จะมีเปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 135.34 wt% ขี้ตะกรันอะลูมิเนียมลงไป 5 wt% จะมีเปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 80.05 wt% เมื่อผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมลงไป 7 wt% จะมีเปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือ 76.66 wt% และเมื่อผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมลงไป 9 wt% จะมีเปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาดลดลงเหลือเพียง 25.61 wt% เท่านั้น

ดังแสดงในรูป 4.9 จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาพรณ ทุมสอน [14] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมเปลือกหอยแครงบดที่สูงขึ้น, ผ.ศ.ดร.สมนึก สังข์หนู [15] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมเปลือกหอยแครงบดที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับ Mihai Rusu Et.al [23] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมผงสังกะสีที่สูงขึ้น และ A.S. Luyt Et.al [24] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการผสมผงทองแดงที่สูงขึ้น

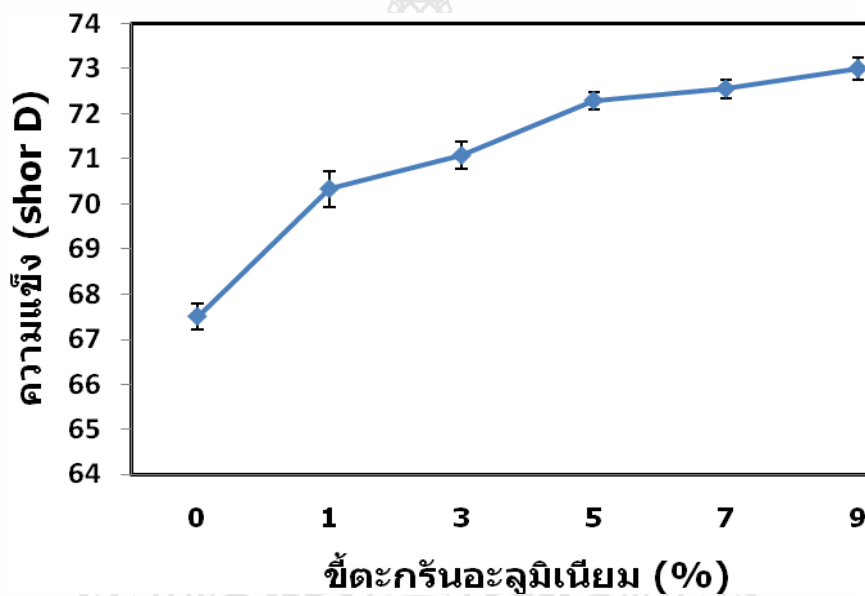


รูปที่ 4.9 การยึดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

4.3.2 การทดสอบความแข็ง

ในการทดสอบความแข็งของพอลิพรอพิลีนที่ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมพบว่าความแข็งของพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขี้ตะกรันอะลูมิเนียมมีความแข็งมากกว่าพอลิพรอพิลีน เมื่อผสมลงพอลิพรอพิลีนจึงทำให้เพิ่มจุดความแข็งตามขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่กระจายตัวอยู่ในพอลิพรอพิลีน ดังนั้นจึงทำให้พอลิพรอพิลีนมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยพอลิพรอพิลีนที่ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม 9 % wt มีค่าความแข็งสูงสุดคือ 73.02 Shore D ซึ่งมีค่าความแข็งสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมซึ่งมีค่าความแข็งต่ำที่สุดคือ 67.50 Shore D อยู่ 5.52 Shore D แต่มีค่าความแข็งสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม 5 และ 7% wt เพียงเล็กน้อย คือ

สูงกว่า 0.73 และ 0.46 Shore D ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.10 จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ สุภาภรณ์ ทูมสอน [14] ที่มีการผสมเปลือกหอยแครงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, ผ.ศ.ดร.สมนึก สังข์หนู [15] ที่มีการผสมอะลูมิเนียมฟอยล์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, János Móczó [22] ที่มีการเติมเส้นใยจากธรรมชาติลงในพอลิพรอพิลีน, Mihai Rusu Et.al [23] ที่มีการผสมผงสังกะสีลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, A.S. Luyt Et.al [24] ที่มีการผสมผงทองแดงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและในพอลิเอทิลีนเชิงเส้น และ M.H. Choa Et.al [26] ที่มีการผสม MoS_2 , Al_2O_3 และ ธาตุอื่นๆ ลงในเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าการผสมวัสดุที่มีความแข็งกว่าพอลิเมอร์ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความแข็งขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้

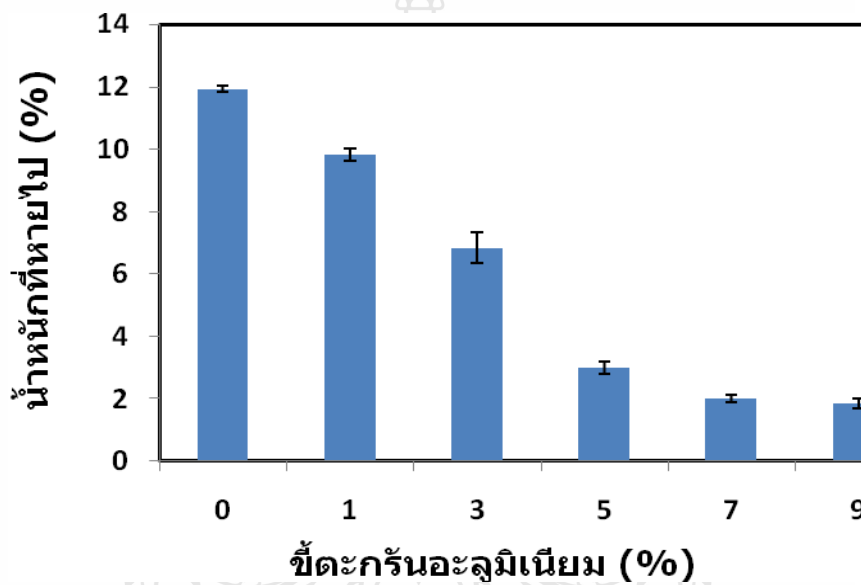


รูปที่ 4.10 ความแข็งของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

4.3.3 การทดสอบความเสียดทาน

จากผลการทดลองพบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ ขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุผสมมีส่วนของขี้ตะกรันอะลูมิเนียมซึ่งมีความแข็งและทนการเสียดทานมากกว่า พอลิพรอพิลีน ทำให้วัสดุผสมที่ได้มีความสามารถทนทานต่อการขัดสีมากกว่า พอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม โดยจากกราฟที่ 4.10 เห็นได้ว่าค่าการลดลงของน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนลดลงถึง 12 % ในขณะที่เมื่อเติมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมลงไปเล็กน้อยค่าการลดลงของน้ำหนักลดลงเหลือ 10% และลดลงต่ำสุดที่สัดส่วน 9% ค่าการลดลงของน้ำหนักเหลือ 2% ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับ Yiqun Liu Et.al [17] ที่ผสมผง

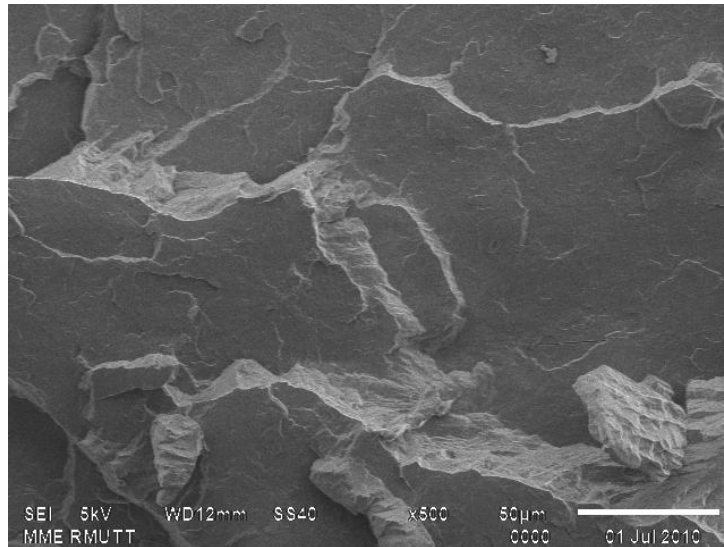
ยาง SBR และ NBR ขนาดนาโนลงในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ พบว่าผงยางขนาดนาโนที่ผสมลงในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ส่งผลให้พอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ สามารถต้านการเสียดทานได้มากขึ้น, M.H. Cho and S. Bahadur [25] ที่ผสมคอปเปอร์ออกไซด์ขนาดนาโนลงในพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ พบว่าพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ สามารถทนการเสียดทานได้มากขึ้นเมื่อผสมคอปเปอร์ออกไซด์ขนาดนาโนลงไป และ M.H. Cho Et.al [26] ที่ผสม MoS_2 , Al_2O_3 และธาตุอื่นๆ ลงในเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ พบว่า MoS_2 และ Al_2O_3 ที่ผสมลงเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ส่งผลให้สามารถทนการเสียดทานได้มากขึ้นเช่นกัน



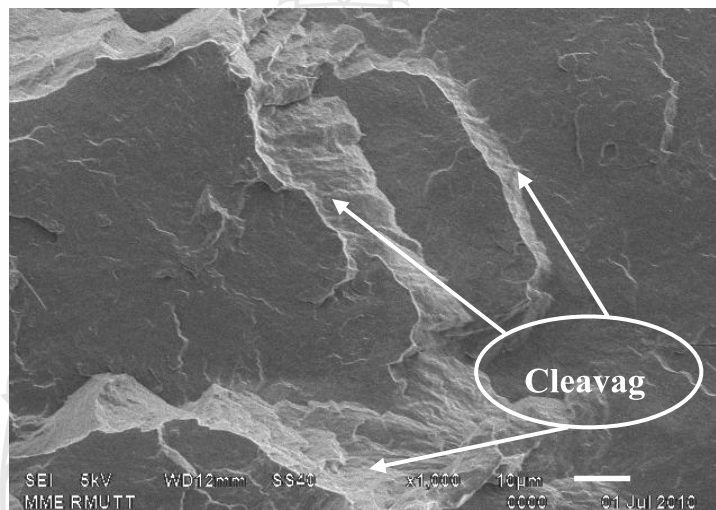
รูปที่ 4.11 น้ำหนักที่ลดลงจากการทดสอบความเสียดทานของพอลิพรอพิลีนที่ปริมาณการผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม ที่ปริมาณสารตัวเติม 0 - 9 wt%

4.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียม

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าอนุภาคของขี้ตะกรันอะลูมิเนียมมีการกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนมากขึ้นตามปริมาณของการเติมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น จากการที่อนุภาคขี้ตะกรันอะลูมิเนียมกระจายแทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีน ทำให้พอลิพรอพิลีนมีความเป็นเนื้อเดียวลดลง ส่งผลให้มีค่าการยึดตัวที่จุดขาดลดลง แต่อนุภาคของขี้ตะกรันอะลูมิเนียมมีความแข็งและสามารถทนการเสียดสีมากกว่าพอลิพรอพิลีน จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งและทนการเสียดทานเพิ่มขึ้น กว่าพอลิพรอพิลีนปกติ

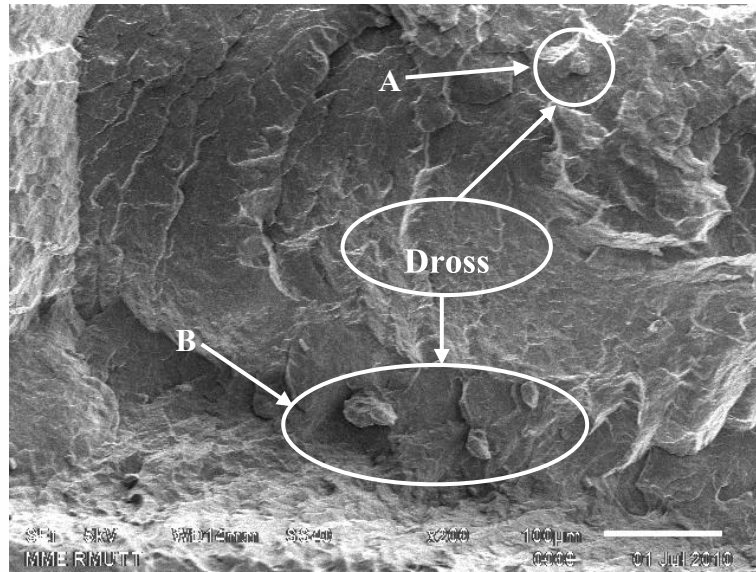


รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของพอลิพรอพิลีน 100% (X500)



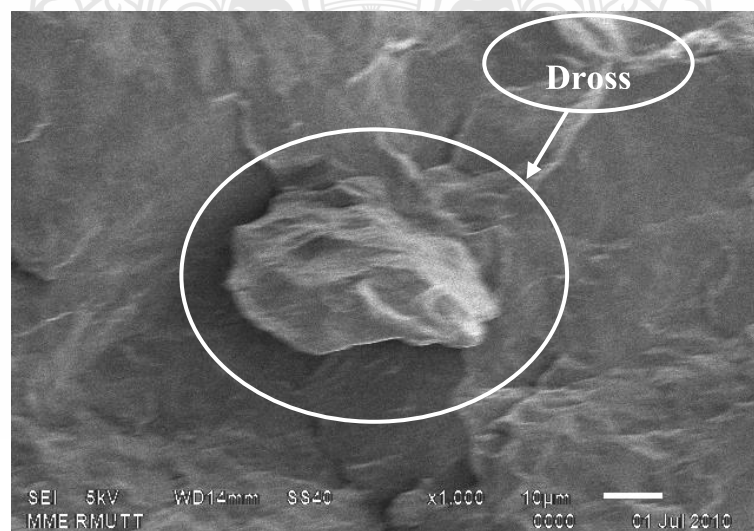
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของพอลิพรอพิลีน 100% (X1,000)

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



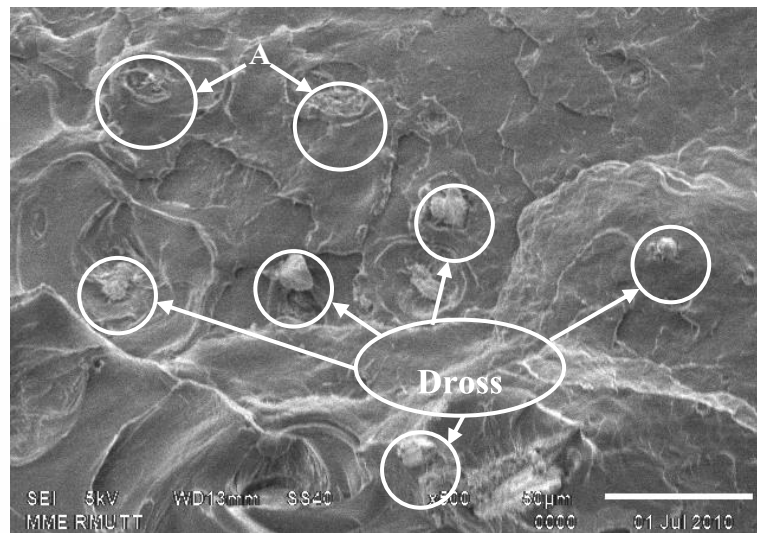
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1 wt% (X200)

รูปที่ 4.14 เป็นโครงสร้างจุลภาคของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1% โดยนำหน้าที่กำลังขยาย 200 เท่า จากรูปเห็นว่ามีอนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีน แต่อนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการผสมซีตะกรันอะลูมิเนียมในปริมาณที่น้อย โดยมีอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม 1 อนุภาคกระจายตัวอยู่ด้านบนของรูป 4.13 (แสดงในลูกศร A) และมีอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม 3 อนุภาคเกาะกลุ่มกันอยู่ที่ด้านล่างของรูป 4.13(แสดงในลูกศร B)



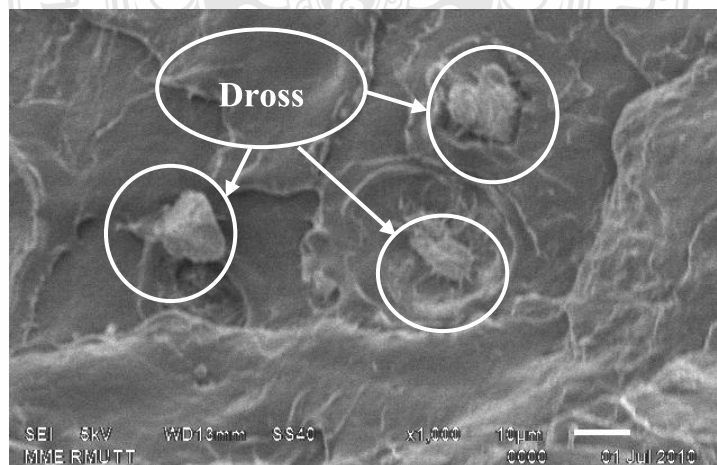
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 1 wt% (X1,000)

รูปที่ 4.15 เป็น โครงสร้างจุลภาคของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนักที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงให้เห็นอนุภาคซีตะกัณอะลูมิเนียมที่อยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนอย่างชัดเจน



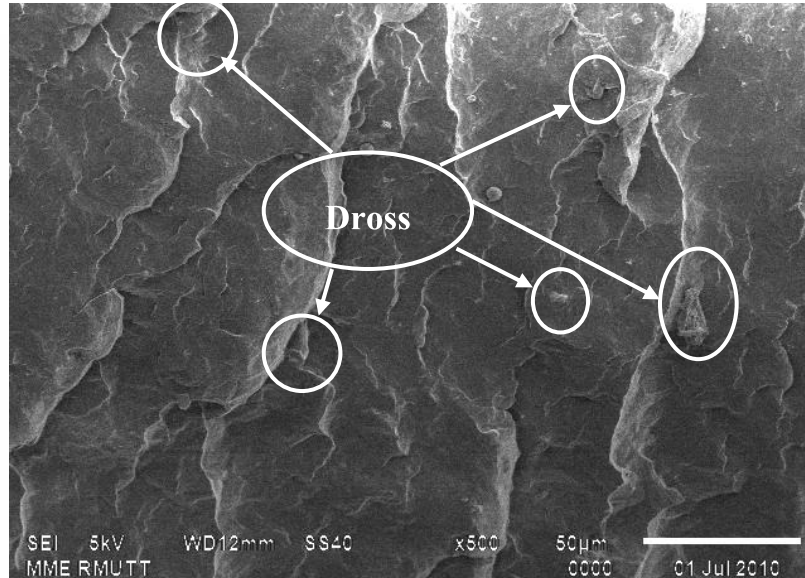
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 3 wt% (X500)

รูปที่ 4.16 เป็น โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 3% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 500 เท่า จากรูปอนุภาคของซีตะกัณอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนเพิ่มมากขึ้นกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของอนุภาคซีตะกัณอะลูมิเนียมในเนื้อของพอลิพรอพิลีนสม่ำเสมอกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 1% จากรูปที่ 4.14 มีอนุภาคของซีตะกัณอะลูมิเนียมหลุดออกไปจากเนื้อของพอลิพรอพิลีน (แสดงในลูกศร A) เนื่องจากขั้นตอนการนำพอลิเมอร์ผสมนี้ไปหักในไนโตรเจนเหลว



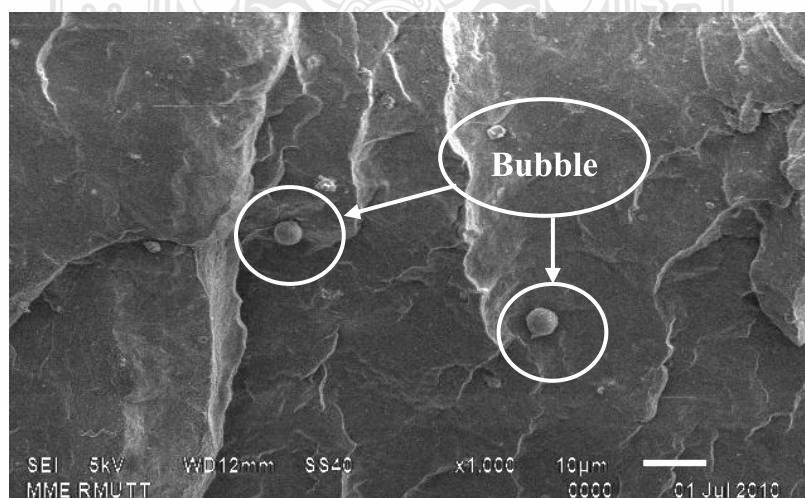
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 3 wt% (X1,000)

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



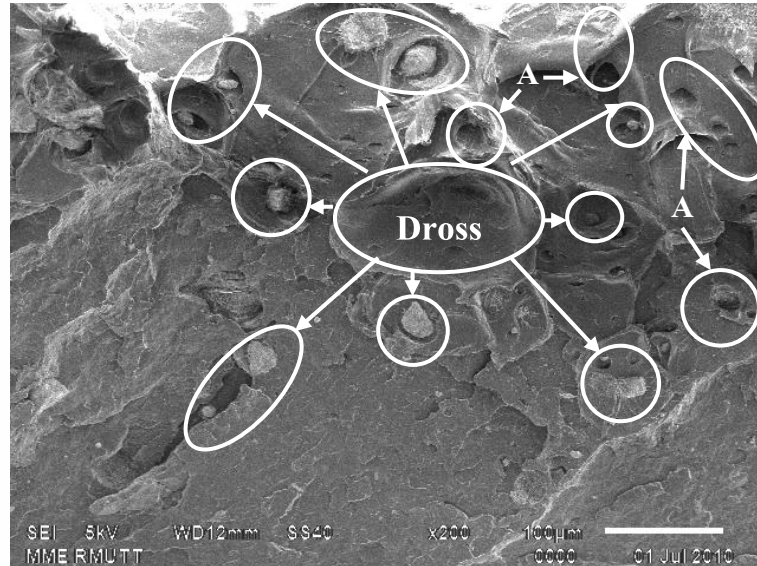
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5 wt% (X500)

รูปที่ 4.18 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 500 เท่า อนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิพรอพิลีนค่อนข้างสม่ำเสมอ



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

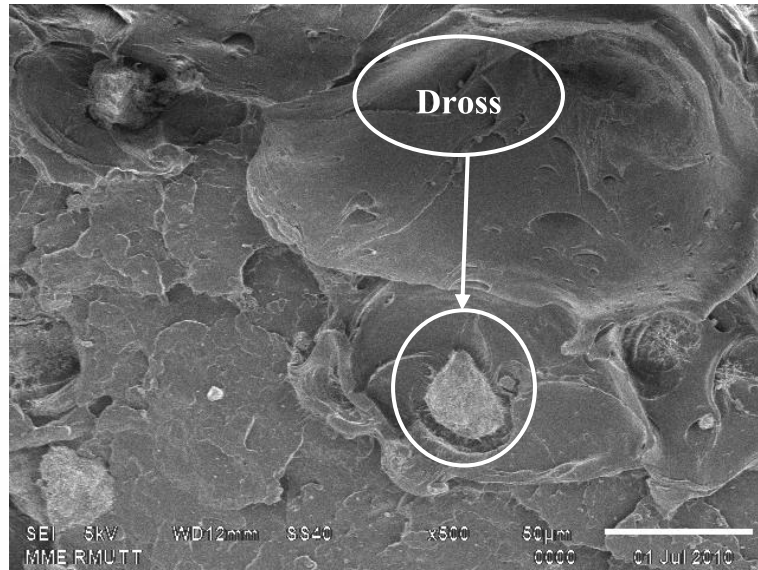
รูปที่ 4.19 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จากรูปพบว่ามีฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนด้วย โดยสังเกตได้จากฟองอากาศนั้นจะมีลักษณะกลมมดมาก และโปร่งแสง โดยสาเหตุการเกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิพรอพิลีนอาจเกิดจากขั้นตอนการขึ้นรูปและการหล่อเย็น



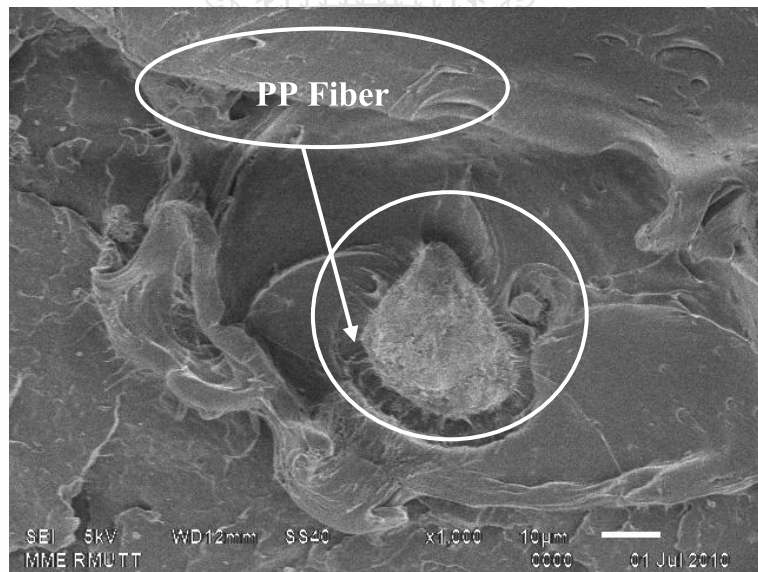
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7 wt% (X200)

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

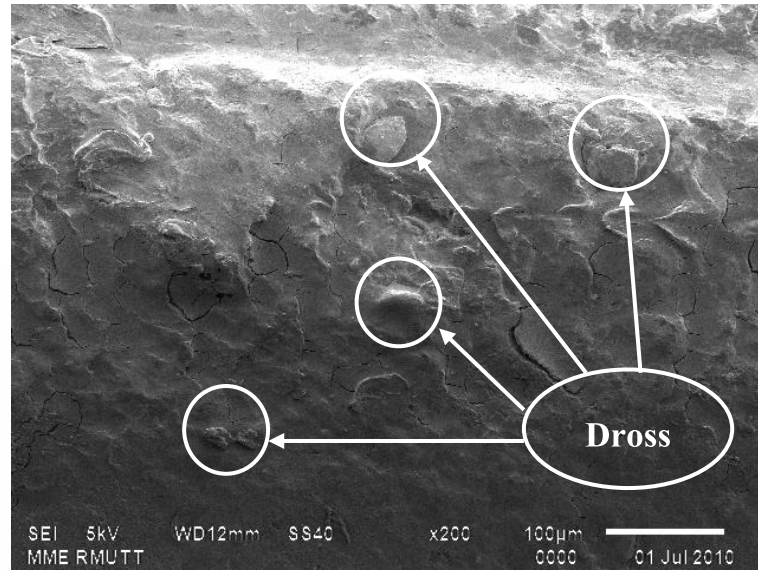
รูป 4.21 ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7% โดยน้ำหนัก พบว่ามีบางสิ่งยื่นออกมารอบๆอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม และในรูปที่ 4.22 เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 7% โดยน้ำหนัก พบว่าที่อนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมมีเส้นใยของพอลิพรอพิลีนเกาะอยู่รอบๆ แสดงว่าระหว่างอนุภาคของซีตะกรันอะลูมิเนียมและพอลิพรอพิลีน มีความเข้ากันส่งผลให้เกิดการยึดเกาะระหว่างพอลิพรอพิลีนและซีตะกรันอะลูมิเนียมที่ดี



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกั่วอะลูมิเนียม 7 wt% (X500)

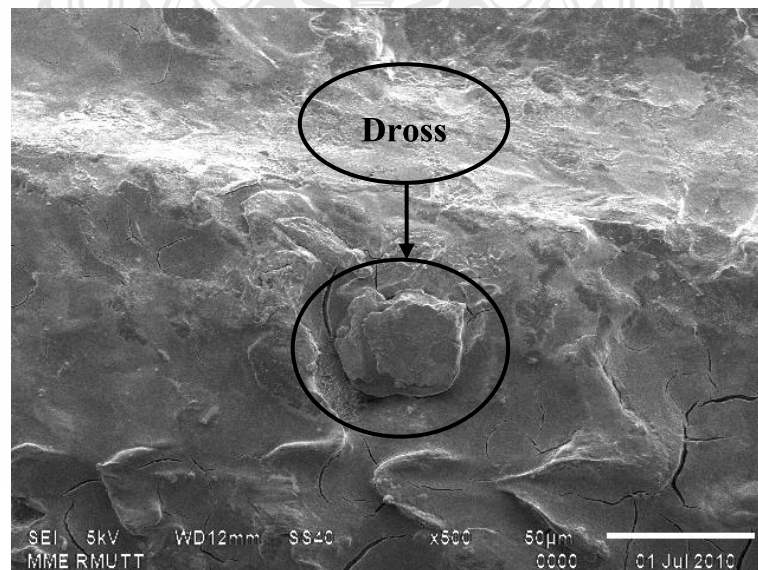


รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกั่วอะลูมิเนียม 7 wt% (X1000)



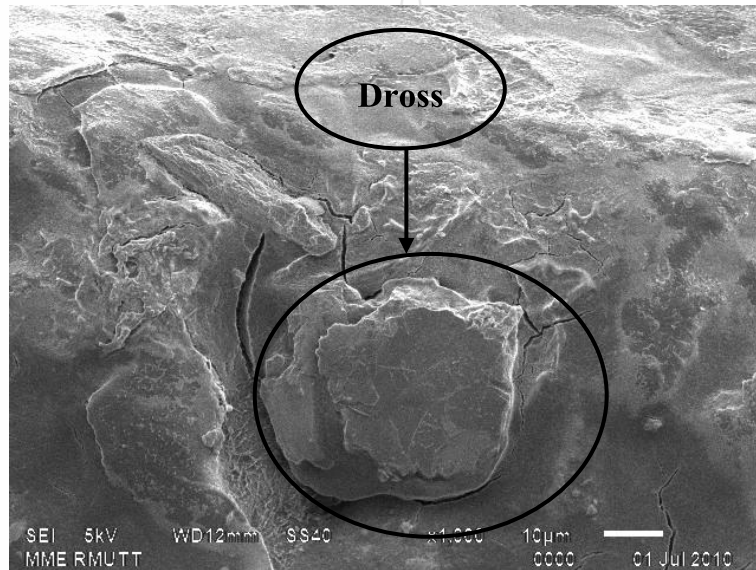
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 9 wt% (X200)

จากรูปที่ 4.23 เป็นโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 9% โดยน้ำหนักที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่ารูปที่ได้ออกมามีลักษณะคล้ายโคลนปกคลุมอยู่บนผิวชิ้นงาน เนื่องจากการนำชิ้นงานไปจุ่มในโตรเจนเหลวนานเกินไป ในโตรเจนเหลวจึงปกคลุมอยู่บนผิวชิ้นงานเป็นลักษณะคล้ายโคลน จึงเห็นอนุภาคของซีตะกรันถูกปกคลุมอยู่ ส่วนซีตะกรันอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กถูกปกคลุมจนมองไม่เห็น



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

ในรูปที่ 4.24 ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ได้ออกมามีคราบลักษณะคล้ายโคลนปกคลุมอยู่บนผิวชิ้นงานเหมือนกับรูปที่ 4.23 และในรูปที่ 4.25 เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 เท่าไปที่อนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียม ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 9% พบว่ารอบๆของซีตะกรันอะลูมิเนียมไม่มีเส้นใยของพอลิพรอพิลีนเกาะอยู่ ส่งผลให้การเกาะตัวกันระหว่างพอลิพรอพิลีนกับอนุภาคซีตะกรันอะลูมิเนียมไม่ดี ทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวของพอลิพรอพิลีนลดลง ส่งผลให้มีความสามารถในการยึดตัวได้น้อย



รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 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 ส่งผลให้วัสดุผสมที่ได้มีความสามารถในการยืดตัวลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียมมีค่าสูงสุดคือ 299.88% สำหรับพอลิพรอพิลีนที่มีการผสมซีตะกัณอะลูมิเนียมลงไปนั้น พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 1% wt มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดดีที่สุดคือ 180.42%

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

จ. เนื่องจากโครงสร้างหลักของวัสดุผสมที่ได้ ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างหลักของพอลิพรอพิลีน จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ฉ. พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 7% wt จะมีคุณสมบัติโดยรวมดีที่สุดคือ มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 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 จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดสูงกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 9% wt ถึง 55% ซึ่งจากการที่มีความสามารถในการยืดตัวสูง ส่งผลให้ พอลิพรอพิลีนที่ผสมซีตะกัณอะลูมิเนียม 7% wt

มีทั้งความแข็ง ความสามารถในการทนความเสียดทานสูงแล้ว และยังมีความสามารถในการยึดตัวดีอีกด้วย

5.1.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมทางความร้อน

ก. ปริมาณขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เติมลงไป ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผสม เนื่องจากเนื้อพอลิพรอพิลีนเท่านั้นที่เกิดการหลอมเหลว โดยอุณหภูมิหลอมเหลวจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 129-132 °C

ข. ความเป็นผลึก (% Crystallinity) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมสูงขึ้น เนื่องจากขี้ตะกรันอะลูมิเนียมมีความเป็นผลึกสูงกว่าพอลิพรอพิลีน ดังนั้นเมื่อผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกมากขึ้น จากผลการทดลองนี้ได้แสดงว่าขี้ตะกรันอะลูมิเนียมส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดผลึกได้ดีขึ้น โดยพอลิพรอพิลีนที่ผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม 9% wt จะมีความเป็นผลึกสูงสุด คือ 36% และมีอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ 122 °C

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมกับพอลิเมอร์ประเภทอื่นเช่น PVC และ PE เพื่อใช้ในการลดต้นทุน ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้ เช่น กั้นชนรถยนต์ ท่อน้ำทิ้ง ท่อสายไฟ เป็นต้น

5.2.2 ควรใช้สารปรับแต่งผิวขี้ตะกรันอะลูมิเนียม หรือใช้สารเติมแต่งที่เรียกว่าสารประสาน (Coupling agent) ซึ่งจะช่วยให้แรงยึดระหว่างพอลิพรอพิลีนกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียม ลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุผสม ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการยึดตัวเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, **เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน**, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2527.
- [2] รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี, **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1**, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] รศ.ดร. เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. 2549 “**ความสะอาดของอะลูมิเนียม หลอมเหลวสำหรับการหล่อโลหะ**” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] สมาคมไทยคอมโพสิต, **คอมโพสิต**, สำนักพิมพ์โอ.เอส. พรินต์ติ้งเฮาส์ จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2548.
- [5] รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, **วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1**, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] ดร. อารี ชนบุญสมบัติ ภัทรารวรรณ คหะวงษ์ และศุภมาส ด้านวิทยากร, “**เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค**” ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- [7] พรรณทิพย์ ตั้งปริยารักษ์. การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิค Sieve analysis. LAB today. ปีที่6, 40 (เม.ย 2550) : หน้า 30-33
- [8] โครงการตำรา, **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์**, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง,
- [9] ผศ.ดร. นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล, **ปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม 2**, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 3, พ.ศ. 2541
- [10] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, **คู่มือการใช้โลหะเพื่อการหีบหล่อ**, สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัดโอเดียนสแควร์, พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2527.
- [11] 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.
- [12] Monsanto, **Standard Tension General Purpose test manual**.
- [13] Geankoplis, C.J. 2003. **Transport process and separation process principles**. 4th ed. Prentice Hall Professional Technical Reference, New Jersey.
- [14] สุภาภรณ์ ทุมสอน, **ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และ สมบัติของพอลิเอทธิลีนที่ผสมกับเปลือกหอยแครง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.

- [15] ผ.ศ.ดร.สมนึก สังข์หนู, เจษฎา วงษ์อ่อน. 2551. “การศึกษาเส้นใยผสมระหว่างพอลิเอทรีลีนกับ อะครีนิยมฟอยล์นำกลับมาใช้ใหม่”. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [16] Yiqun Liu, Xiaohong Zhang. 2004 “**Toughening of polypropylene by combined rubber system of ultrafine full-vulcanized powdered rubber and SBS**” SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry Plastic Processing Center. China.
- [17] Yiqun Liu, Zhongqing Fan. 2006 “**Application of nano powdered rubber in friction materials**” SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry Plastic Processing Center. China.
- [18] M. Cirino, K. Friedrich. 2006 “Evaluation of polymer composites for sliding and abrasive wear applications” **Polymer and Composites Group** Technical University of Hamburg-Harburg.
- [19] V. V. Moshev, O. C. Garishin. 2003. “**Physical discretization approach to evaluation of elastic moduli of highly filled granular composites**” Ural Department of Russian Academy of Science Institute of Continuous Media Mechanics, Academic Korolev.
- [20] Et Evans, M J Kay, N kirkoatrick and D s Wales. 1996. “**The chemistry and processing of wood and plant fibrous Materials**” Wood Publishing Co Ltd. Great Britain.
- [21] H.M.J.C. Pitawala, M.A.K.L. Dissanayake, 2007. “**Combined effect of Al₂O₃ nano-fillers and EC plasticizer on ionic conductivity enhancement in the solid polymer electrolyte (PEO), LiTf**” ^aPostgraduate Institute of Science University of Peradeniya, Peradeniya, Sri Lanka.
- [22] 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
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.

- [26] 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.
- [27] Ye.P. Mamunya , V.V. Davydenko , P. Pissis and E.V. Lebedev, 2002 “**Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders**” Institute of Macromolecular Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine.
- [28] ใบรายการแสดงสมบัติของพอลิพรอพิลีนเกรด PP เกรด H255JA, บริษัทเครือซีเมนต์ไทย.
- [29] ใบรับรองส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อเกรด A356M, บริษัท เอนโก ไทย จำกัด



ภาคผนวก ก
การทดลองผสมพอลิพรอพิลีนกับซีตากรันอะลูมิเนียมเบื้องต้น



การทดลองผสมพอลิพรอพิลีนกับจีตะแกร์นอะลูมิเนียมเบื้องต้น

1. การผสมพอลิพรอพิลีนกับจีตะแกร์นอะลูมิเนียมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single Screw Extruder)

การผสมพอลิพรอพิลีนกับจีตะแกร์นอะลูมิเนียมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว มีขั้นตอนการผสมดังนี้

- 1.1 นำพอลิพรอพิลีนและจีตะแกร์นอะลูมิเนียมไปชั่งน้ำหนักสำหรับผสม โดยมีปริมาณการผสมดังแสดงในตาราง ก-1
- 1.2 นำอะลูมิเนียมออกไซด์กับพอลิพรอพิลีนไปผสมจะในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว
- 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 เส้นพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมมาทางคายน



รูปที่ ก.5 เส้นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านจากเครื่อง Single Screw Extruder ถูกทำให้เย็นตัวในน้ำ



รูปที่ ก.6 การตัดเส้นพอลิเมอร์เป็นเม็ดพอลิเมอร์

2. การเลือกช่วงการผสม

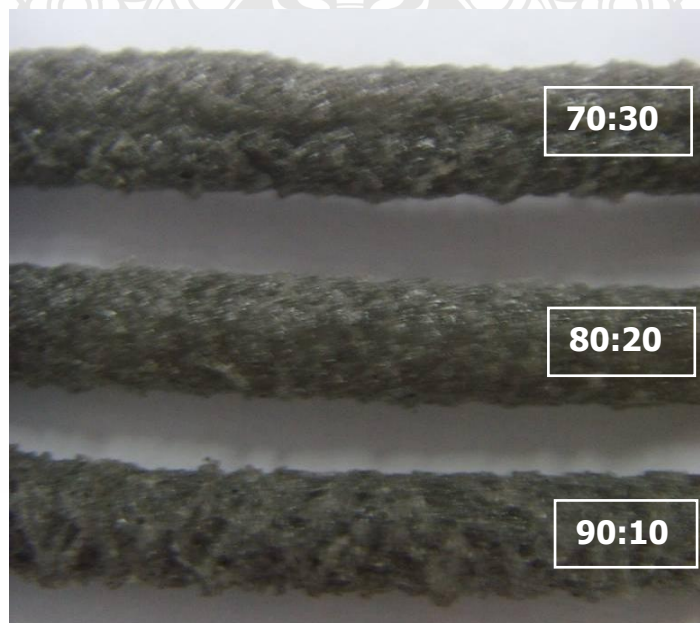
เนื่องจากยังไม่เคยมีการศึกษาวิจัยโดยการนำจีตะกัณอะลูมิเนียมผสมในพอลิเมอร์มาก่อน ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกช่วงการผสมกว้างๆ เพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลในการนำไปเลือกช่วงการผสมอย่างละเอียดอีกครั้ง โดยผู้วิจัยสุ่มเลือกการผสมจีตะกัณอะลูมิเนียมในพอลิพรอพิลีน ที่ 10, 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก และมีตัวแปรในการผสมดังแสดงในตาราง ก.1 โดยจีตะกัณอะลูมิเนียมผสมนั้นยังไม่ได้ผ่านการคัดแยกขนาด

ตารางที่ ก.1 การผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับชีตะกรันอะลูมิเนียมในการเลือกช่วงการผสม

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 ผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับชีตะกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

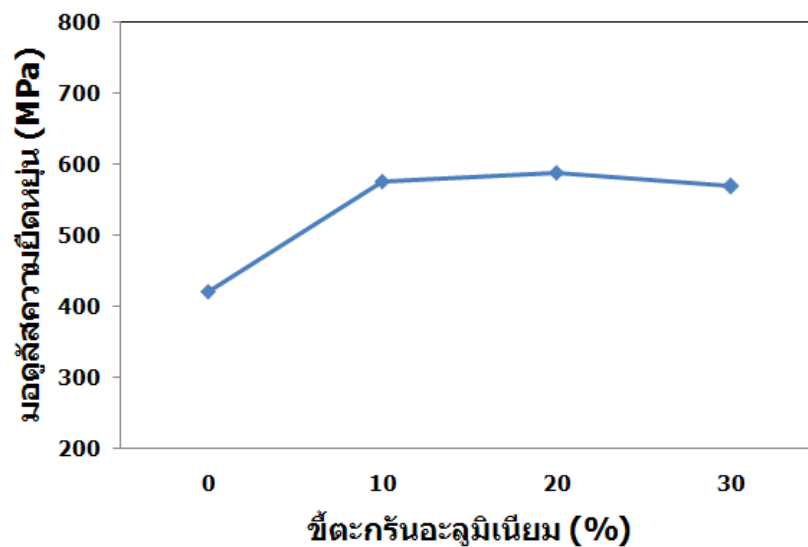
จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว พบว่าเส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสีเข้มขึ้น เป็นสีเทา มีลักษณะผิวหยาบ ขรุขระ มีหลุมฟองอากาศตามผิว เมื่อหักหรือบิดจะหักได้ง่าย ดังรูป ก.8

2.1 การทดสอบแรงดึงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับซีตะกรันอะลูมิเนียมเพื่อเลือกช่วงการผสม

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

ก. โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

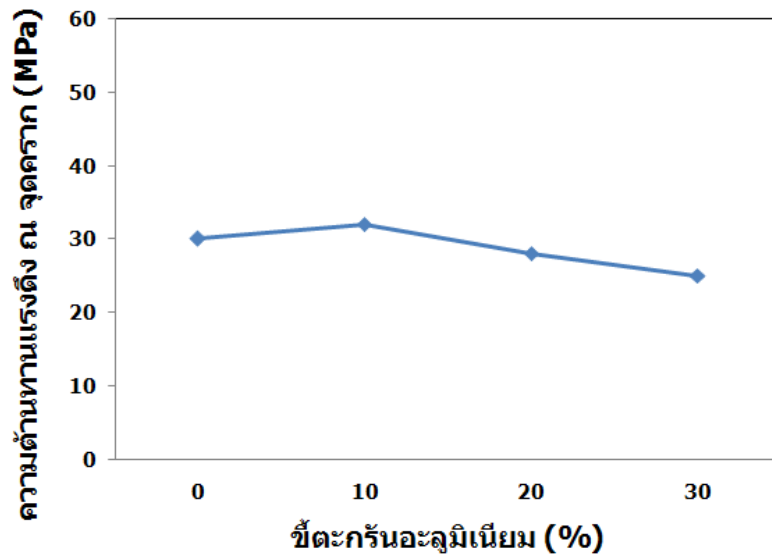
ซีตะกรันอะลูมิเนียมที่ผสมลงในพอลิพรอพิลีนส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนสูงขึ้น โดยส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 10 และ 20 % มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน ขณะที่ส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 30 % จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นตกลงมาเล็กน้อย



รูปที่ ก.9 โมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

ข. ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)

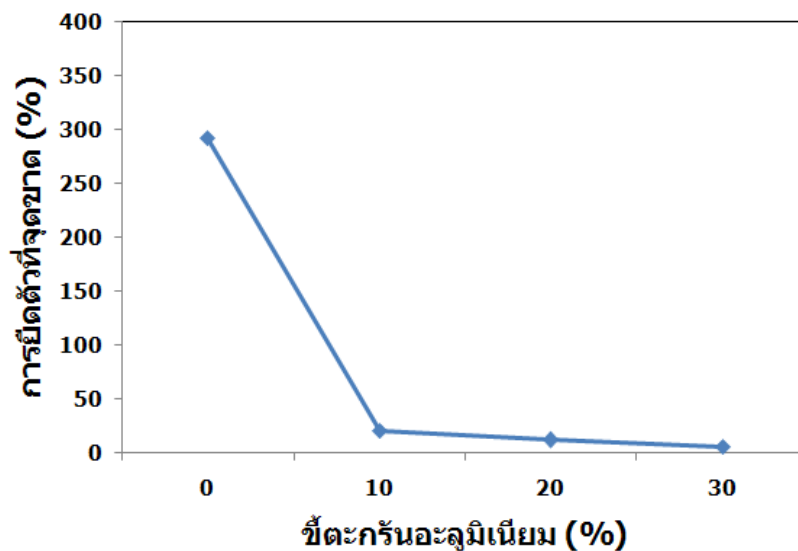
ซีตะกรันอะลูมิเนียมที่ผสมลงในพอลิพรอพิลีนไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ของพอลิเมอร์ โดยที่ ส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 10 % จะมีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก สูงขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ส่วนผสมซีตะกรันอะลูมิเนียม 20 และ 30 % จะมีความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากต่ำกว่าพอลิพรอพิลีนเล็กน้อย



รูปที่ ก.10 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

ก. เปรอ์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

ซีตกรันอะลูมิเนียมที่ผสมลงในพอลิพรอพิลีนส่งผลมีความสามารถในการยืดตัวลดลงอย่างมาก โดยที่ส่วนผสมซีตกรันอะลูมิเนียม 10 % มีความสามารถในการยืดตัวดีกว่าที่ส่วนผสมซีตกรันอะลูมิเนียม 20 และ 30 %



รูปที่ ก.11 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

2.2 สรุปผลการทดลองการเลือกช่วงการผสม

จากการทดสอบแรงดึงพบว่าช่วงที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงที่ผสมจีตะกรันอะลูมิเนียมไม่เกิน 10 % เนื่องจากที่การผสมจีตะกรันอะลูมิเนียม 10 % จะมีความสามารถในการยึดตัวและความแข็งแรง ณ จุดครากดีที่สุด ส่วนค่ามอดูลัสนั้นทุกสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน

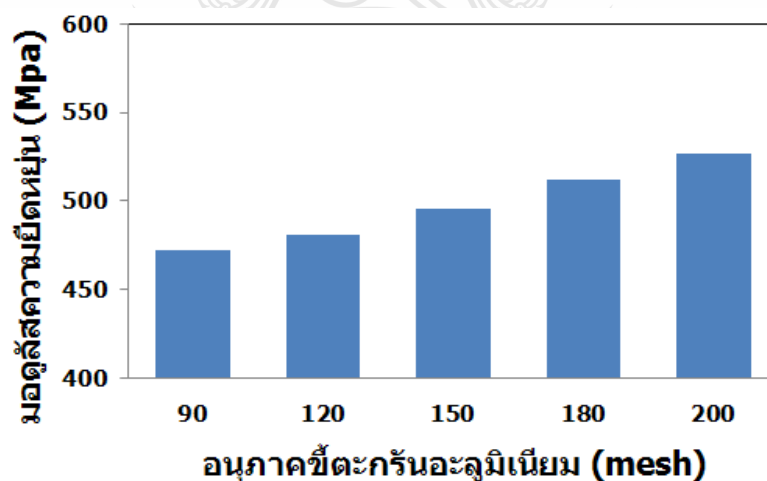
3 การเลือกขนาดอนุภาคจีตะกรันอะลูมิเนียม

จากการบดและคัดแยกขนาดจีตะกรันอะลูมิเนียม ทางผู้วิจัยสามารถคัดแยกได้หลายขนาดประกอบไปด้วยขนาดตะแกรงร่อนเบอร์ 90 เมช (178 μm), 120 เมช (125 μm), 150 เมช (104 μm), 180 เมช (89 μm) และ 200 เมช(75 μm) ทางผู้วิจัยจึงทดลองใช้อนุภาคจีตะกรันอะลูมิเนียมขนาดต่างผสมในพอลิพรอพิลีน โดยผสมจีตะกรันอะลูมิเนียม 5% ที่ตัวแปรการผสม การขึ้นรูปและทดสอบแรงดึง แบบเดียวกันกับการเลือกช่วงการผสม เพื่อเลือกขนาดอนุภาคที่ส่งผลให้พอลิพรอพิลีนมีสมบัติที่ดีที่สุด

3.1 การทดสอบแรงดึงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับจีตะกรันอะลูมิเนียมเพื่อเลือกขนาดอนุภาค

ก. มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

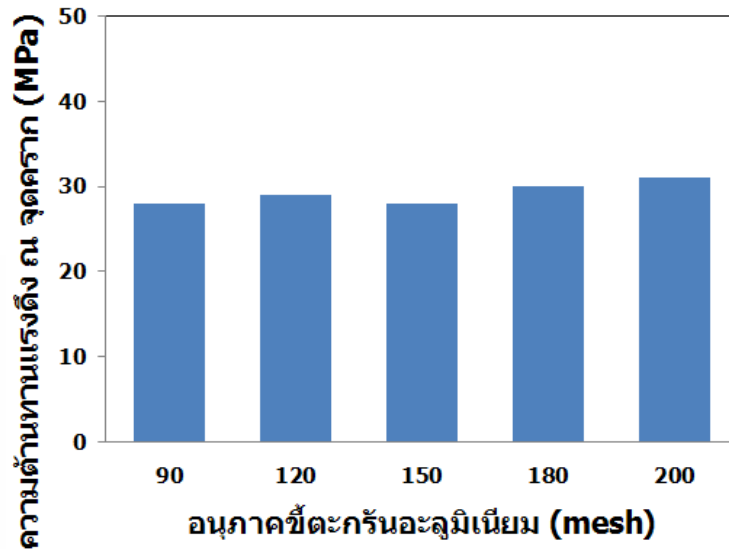
ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะส่งผลในพอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง [6]



รูปที่ ก.12 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับจีตะกรันอะลูมิเนียมที่อนุภาคขนาดต่างๆ

ข. ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)

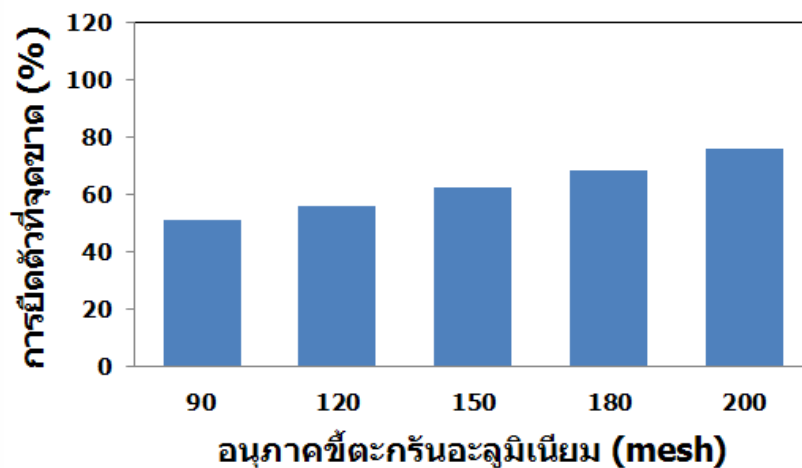
ขนาดของอนุภาคไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากโดยขนาดอนุภาคของจีตะกรันอะลูมิเนียมที่มีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากดีที่สุดคือ ที่ 200 เมช



รูปที่ ก.13 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียมที่อนุภาคขนาดต่างๆ

ค. เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

พอลิพรอพิลีนมีแนวโน้มสามารถยืดตัวได้สูงขึ้น เมื่อผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียมที่มีอนุภาคขนาดเล็กลง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะส่งผลในพอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่



รูปที่ ก.14 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตะกรันอะลูมิเนียมที่อนุภาคขนาดต่างๆ

3.2 สรุปผลการทดลองการเลือกขนาดอนุภาคขี้ตะกรันอะลูมิเนียม

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

4 การผสมพอลิพรอพิลีนกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียมขนาด

จากการเลือกช่วงปริมาณการผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม และการเลือกขนาดอนุภาคขี้ตะกรันอะลูมิเนียม ผู้วิจัยจึงใช้ขี้ตะกรันอะลูมิเนียมอนุภาคขนาด 200 เมช ที่สัดส่วนการผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียม 1-9 % โดยน้ำหนัก ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดยมีตัวแปรการผสมดังแสดงในตาราง ก.2

ตารางที่ ก.2 การผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับขี้ตะกรันอะลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาค 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

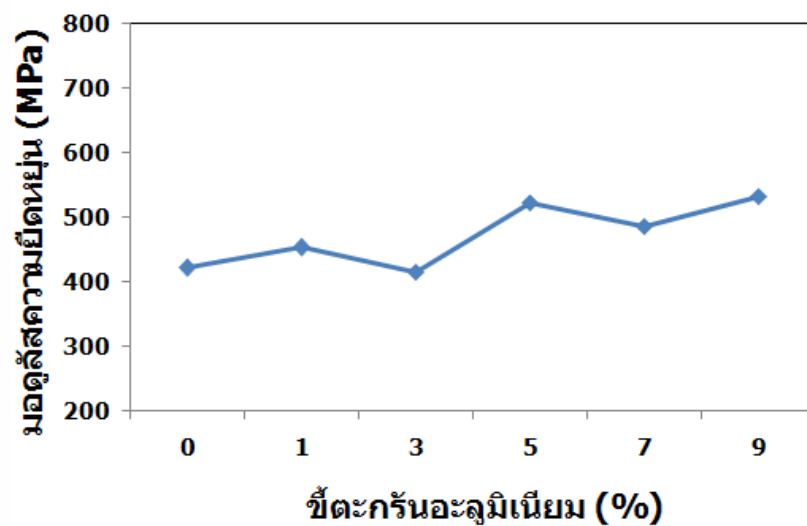


รูปที่ ก.15 เส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

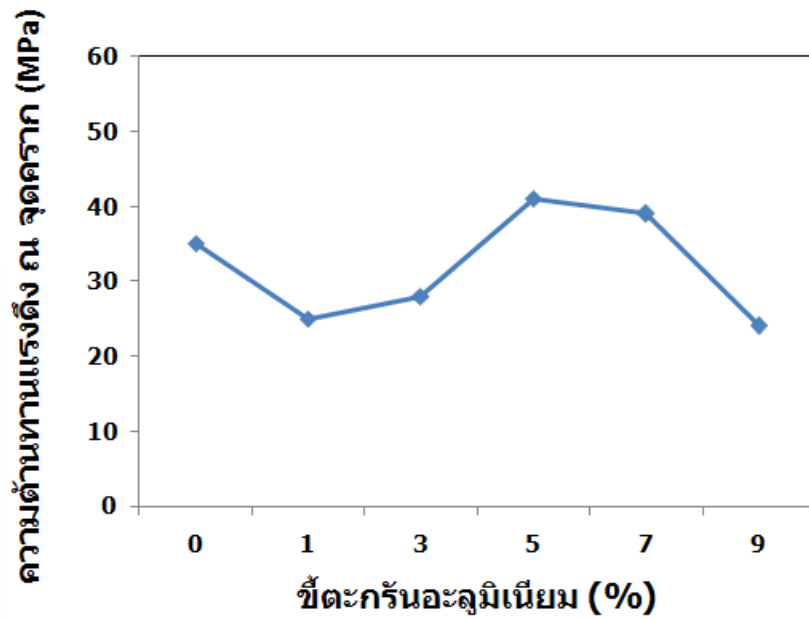
จากการผสมพบว่าโพลิเมอร์ผสมเมื่อสังเกตพอมอร์ผสมที่มีความใสอยู่ที่ ปริมาณการผสม จีตะกรันอะลูมิเนียม 1 และ 3 % พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคจีตะกรันอะลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอ ผิวของของพอลิเมอร์ที่ผสมได้มีความหยาบ ที่ปริมาณการผสมจีตะกรันอะลูมิเนียม 7 และ 9 % ผิวเกิด มีลักษณะหยาบเป็นรอบแตก (Shark skin) มีฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ผสม มีความเปราะมาก สามารถหักได้ง่าย

4.1 การทดสอบแรงดึง

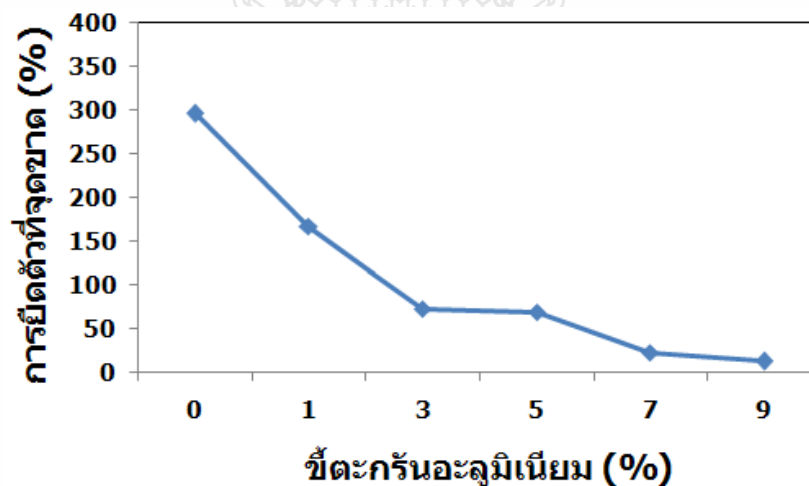
จากการทดสอบแรงดึงพบว่า ค่าอมอดูลัสความยืดหยุ่น การยึดตัวที่จุดขาด และ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากมีความผกผัน ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง (แสดงในรูป ก.16, ก.17 และ ก. 18)เนื่องจากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวกันนั้นทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ มีความบกพร่องในเรื่องความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของอนุภาคจีตะกรันอะลูมิเนียม และการควบคุมความชื้นในการผสมควบคุมได้ยาก



รูปที่ ก.16 มอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับจีตะกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ



รูปที่ ก.17 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

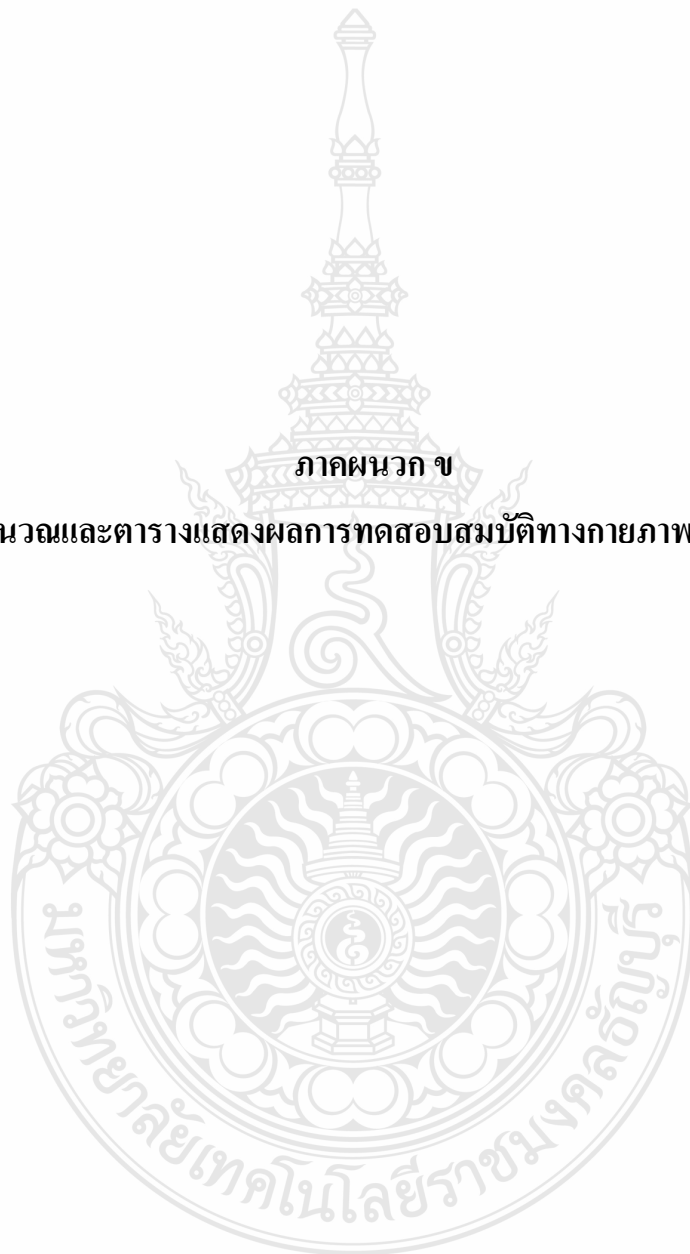


รูปที่ ก.18 การยัดตัวที่จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับซีตกรันอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆ

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

ภาคผนวก ข

การคำนวณและตารางแสดงผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล



1. การคำนวณปริมาณความเป็นผลึกจากเทคนิค DSC

ปริมาณความเป็นผลึก (%crystallinity) คำนวณได้จากสมการ 3.1

1.1 ผลการทดสอบชิ้นงานของส่วนผสม พอลิพรอพิลีน: จีตะกรันอะลูมิเนียม = 100: 0

ได้ค่า Heat flow endo up 54.81 J/g

$$\%crystallinity = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_{f100}} \times \frac{1}{X}$$

$$\%crystallinity = \frac{54.81 \times 100}{189} \times 1$$

$$\%crystallinity = 29.1$$

X คือ เปอร์เซ็นต์ของพอลิพรอพิลีน (PP)

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

1.2 ผลการทดสอบชิ้นงานของส่วนผสม พอลิพรอพิลีน: จีตะกรันอะลูมิเนียม = 99: 1

ได้ค่า Heat flow endo up 60.49 J/g

$$\%crystallinity = \frac{60.24 \times 100}{189} \times \frac{1}{0.99}$$

$$\%crystallinity = 32.2$$

1.3 ผลการทดสอบชิ้นงานของส่วนผสม พอลิพรอพิลีน: จีตะกรันอะลูมิเนียม = 97: 3

ได้ค่า Heat flow endo up 54.81 J/g

$$\%crystallinity = \frac{60.49 \times 100}{189} \times \frac{1}{0.97}$$

$$\%crystallinity = 33.0$$

1.4 ผลการทดสอบชิ้นงานของส่วนผสม พอลิพรอพิลีน: จีตะกรันอะลูมิเนียม = 95: 5

ได้ค่า Heat flow endo up 61.94 J/g

$$\%crystallinity = \frac{61.94 \times 100}{189} \times \frac{1}{0.95}$$

$$\%crystallinity = 34.5$$

1.5 ผลการทดสอบชิ้นงานของส่วนผสม พอลิพรอพิลีน: ซีตะกรันอะลูมิเนียม = 93: 7

ได้ค่า Heat flow endo up 61.70 J/g

$$\%crystallinity = \frac{61.70 \times 100}{189} \times \frac{1}{0.93}$$

$$\%crystallinity = 35.1$$

1.6 ผลการทดสอบชิ้นงานของส่วนผสม พอลิพรอพิลีน: ซีตะกรันอะลูมิเนียม = 100: 0

ได้ค่า Heat flow endo up 61.91 J/g

$$\%crystallinity = \frac{61.91 \times 100}{189} \times \frac{1}{0.91}$$

$$\%crystallinity = 36.0$$

2. สมบัติทางกายภาพและทางกล

ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิการหลอมเหลว

ปริมาณของ ซีตะกรันอะลูมิเนียม (wt%)	อุณหภูมิการหลอมเหลว °C, (T _c)
0	130
1	129
3	130
5	130
7	132
9	131

ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก

ปริมาณของ ซีตะกรันอะลูมิเนียม (wt%)	อุณหภูมิการเกิดผลึก °C, (T _m)
0	116
1	117
3	118
5	120
7	121

9	122
---	-----

ตารางที่ ข.3 ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

ปริมาณของ ซีตะกรันอะลูมิเนียม (wt %)	% การเกิดผลึก
0	29.1
1	32.2
3	33.0
5	34.5
7	35.1
9	36.0

ตารางที่ ข.4 เปอร์เซนต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

ปริมาณของ ซีตะกรันอะลูมิเนียม (wt %)	%การยืดตัวที่จุดขาด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	299.88	24.11
1	180.42	44.25
3	135.34	54.08
5	80.05	60.72
7	76.66	52.31
9	25.61	34.34

ตารางที่ ข.5 ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength)

ปริมาณของ ซีตะกรันอะลูมิเนียม (wt %)	Yield stress (Mpa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	36.06	3.20
1	34.12	4.30
3	35.14	3.80
5	34.27	3.00
7	33.04	3.30
9	32.12	3.30

ตารางที่ ข.6 มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

ปริมาณของ ขี้ตะกรันอะลูมิเนียม (wt %)	มอดูลัส (Mpa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	414	12.52
1	435	22.20
3	447	32.43
5	515	45.12
7	524	23.92
9	568	34.05

ตารางที่ ข.7 ความแข็ง (Hardness)

ปริมาณของ ขี้ตะกรันอะลูมิเนียม (wt %)	ความแข็ง (Shore D)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	67.50	0.31
1	70.33	0.48
3	71.07	0.34
5	72.29	0.22
7	72.56	0.26
9	73.02	0.24

ตารางที่ ข.8 ความเสียดทาน (Abrasion)

ปริมาณของ ขี้ตะกรันอะลูมิเนียม (wt %)	น้ำหนักที่ลดลง	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	11.92	0.14
1	9.80	0.24
3	6.83	0.51
5	2.98	0.22
7	2.00	0.13
9	1.84	0.15

ตารางที่ ข.9 ส่วนผสมทางเคมีของจีตะกรันอะลูมิเนียม

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	สูตรทางเคมี	Score
1	Corundum	Al_2O_3	72
2	Alumina	Al_2O_3	58
3	Aluminum Oxide	Al_2O_3	17
4	Tin Arsenate	Sn_3	14
5	Calcium Aluminum silicate Oxide	$Ca Al_2 Si_2$	13
6	Tin Vanadium Selenium	$Sn V Se_3$	11
7	Germanium Tantalum	$Ge_2 Ta$	11
8	Potassium Copper Sulphur	$Cu_8 K_3 S_6$	11
9	Thallium Azide	$Tl N_3$	10
10	Hafnium Nitride	$Hf_4 N_3$	10
11	Phosphorus	P	9
12	Iron Oxide Chloride	$Fe O Cl$	9
13	Manganese Uranium Oxide	$Mn_3 U_3 O_8$	8
14	Lithium Cobalt Boron Oxide	$Li Co B O_3$	8
15	Potassium Sodium Tellurium	$K Na_5 Te O_6$	8
16	Gallium Germanium Manganese	$Ga_{0.3} Ge_{2.7} Mn_5$	8
17	Strontium Iridium Oxide	$Sr_3 Ir O_5$	8
18	Strontium Tellurate Oxide	$Sr Te O_3$	7

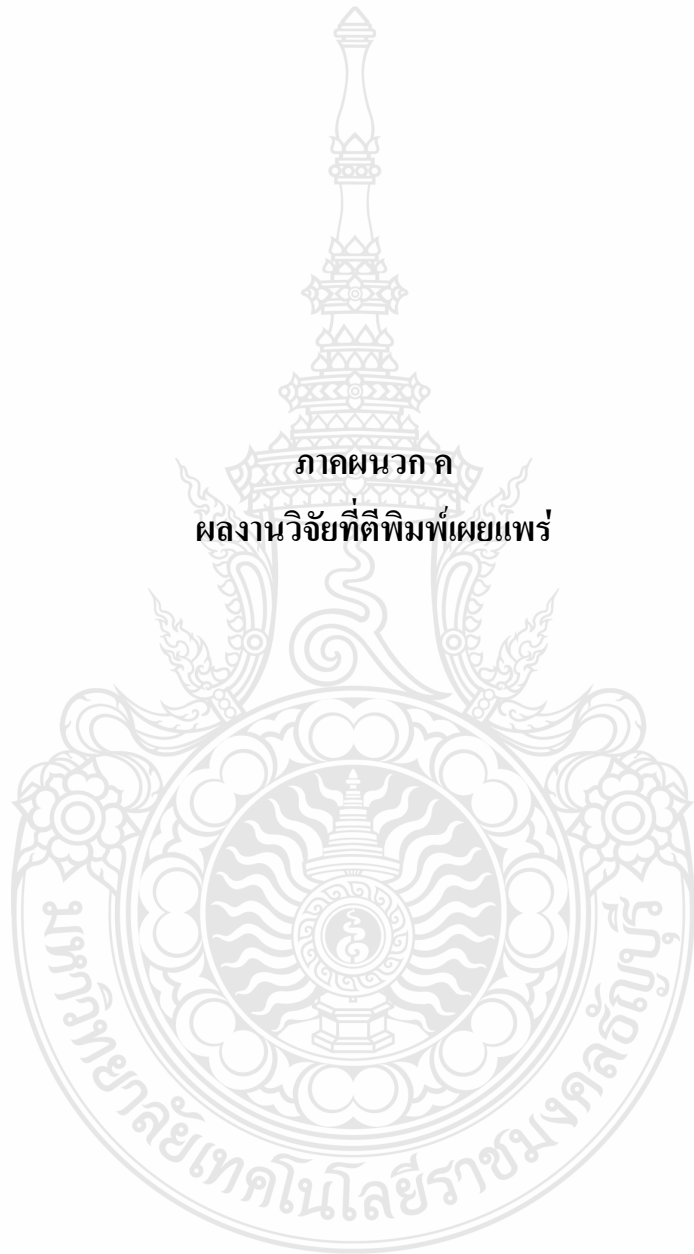
จากการนำจีตะกรันไปหาส่วนประกอบทางเคมีโดย โดยวิเคราะห์จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) ตารางที่ ข-9 แสดงจำนวนครั้งของสารประกอบที่พบในจีตะกรันอะลูมิเนียม เช่นพบ Corundum จำนวน 72 ครั้ง, Alumina จำนวน 58 ครั้ง และ Aluminum Oxide จำนวน 14 ครั้ง เป็นต้น

ตารางที่ ข.10 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด ASTM A356M

ELEMENT	SYMBOL	STANDARD (%)	CONTROL VALUE (%)	PREFERRED TARGET (%)
SILICON	Si	6.5~7.5	6.7~7.3	7.0
IRON	Fe	0.17 MAX.	0.15 MAX.	0.15 MAX.
TITANIUM	Ti	0.20 MAX.	0.10-0.15	0.15
MAGNESIUM	Mg	0.30~0.45	0.30~0.35	0.33
COPPER	Cu	0.10 MAX.	0.03 MAX.	0.03 MAX.
ZINC	Zn	0.10 MAX	0.05 MAX.	0.05 MAX.
NICKEL	Ni	0.05 MAX.	0.05 MAX.	0.05 MAX.
MANGANESE	Mn	0.10 MAX	0.05 MAX.	0.05 MAX.
CALCIUM	Ca	20 ppm. MAX.	20 ppm. MAX.	15 ppm. MAX.



ภาคผนวก ค
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



Proceedings

IE NETWORK CONFERENCE 2010

การประชุมวิชาการสายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2553

13-15 ตุลาคม 2553

โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์
จังหวัดอุบลราชธานี





ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ
ผศ.ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค
รศ.ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย
รศ.ดร.ปารเมศ ชุตินา
รศ.จิรพัฒน์ เกาประเสริฐวงศ์
ผศ.ประเสริฐ อัครประถมพงศ์
ผศ.ดร.ดาริษา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.นภัสดวงศ์ โอสสถิลป์
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน์

ผศ.ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ
ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร
ผศ.ดร.สิริง ปรีชานนท์
ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
อ.ภูมิ เหลืองจามีกร
อ.สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา
ผศ.ดร.มานพ เรี่ยวเดชะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ชัชพันธ์ ขำญาติ
ผศ.ดร.รุ่งรัตน์ ภิสิทธิ์เพ็ญ
ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน
ดร.วรวุฒิ หวังวัชรกุล

ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล
ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์
ดร.นันทชัย กานตานันทะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ

ผศ.ชานนท์ มูลวรรณ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ
ดร.วรพจน์ เสรีรัฐ
ผศ.ดร.วิสนัย วรธนัจฉริยา
ผศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผศ.ดร.วิมลนิ เหล่าศิริถาวร

ผศ.ดร.ศักดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภาแดง
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทคุปต์
ผศ.สันติชัย ชิวสุททธิศิลป์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.ปภากร สุนานนท์
ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล
ผศ.ดร.ยงยุทธ เสริมสุขีอนุวัฒน์

		หน้า
MAM 22	การเปรียบเทียบการเพิ่มอายุการใช้งานเม็ดตัดฟันเฟืองระหว่างวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอทางกายภาพกับการขัดผิวจักรินทรี กลั่นเงิน* และ ชานนท์ มุลวรรณ	68
MAM 23	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหยดน้ำโลหะของการถ่ายโอนและคุณลักษณะของสัญญาณคลื่นเสียงในกระบวนการเชื่อม MAG-M เอกชัย วารินศิริรักษ์* และ บวรโชค ผู้พัฒนา	69
MAM 24	การเตรียมท่อนาโนไททานेट จากผงสีขาวไททานเนียมไดออกไซด์ราคาถูกลงด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล พิสุทธิ เจริญรัตน์* ณัฐพร โทณานนท์ ณรงค์ชัย โอเจริญ ธนกร วิรุฬห์มงคล และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์	70
MAM 25	การเตรียมแผ่นนาโนแมกนีเซียมออกไซด์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลและผลกระทบต่อสมบัติทางกลของการเติมแผ่นนาโนแมกนีเซียมออกไซด์ในโพลีโพรพิลีน นพดล เบี้ยทอง* ศิริชัย ต่อสกุล และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์	71
MAM 26	ผลของกระบวนการออกซิเดชันที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งและการนำไฟฟ้าของโลหะเงินผสมทองแดง เกศราพร วทัญญู*	72
MAM 27	การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวทางความร้อนในตัวกลางกึ่งอนันต์สำหรับเหล็กกล้า SUS 410 จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เอกชัย วารินศิริรักษ์* และ อิศรทัต พึ่งอ้น	73
MAM 28	การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีโพรพิลีนกับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เหลือใช้จากกระบวนการหล่อล้อแม่กรถยนต์ มานัส ศรีสวัสดิ์* และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	74

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป
ดร.บพิท บุปผชาติ

ดร.สุดสาคร อินธิเดช
ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร

มหาวิทยาลัยรังสิต

ดร.พิษณุ มนต์ปิติ
ผศ.ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์
ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร

ผศ.สินี สุขกรมใส
อ.ศิลปชัย วัฒนเสย

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

อ.ภีม พรประเสริฐ
อ.นัทธพงศ์ นันทสำเร็จ

อ.เดชโสภณ ถนอมสุข
ดร.คณอเคลีย วจนะวิชากร

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ
ดร.วราธร ปัญญางาม
ดร.สิริเดช ชาตินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
อ.อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ดร.ธรีณี มณีศรี
อ.จักรพันธ์ กัณหา
อ.ชวลิต มณีศรี
อ.ธนิศ ศรีวะระมย์

อ.พัฒน์พงศ์ อริยสิทธิ์
อ.พิสุทธิ์ รัตนแสนวงษ์
อ.วรพจน์ พันธุ์คง
อ.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง
ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
ผศ.วันชัย ลีลากวีวงศ์

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์นนท์
ผศ.ปฎิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร.กฤษดา อัศวรุ่งแสงกุล
ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี
ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์
ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์

ผศ.สมชาย พรชัยวิวัฒน์
รศ.ดร.อรรถกร เก่งพล
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ.ดร.ณฐา คุปต์ขันธ์
ดร.ระพี กาญจนะ
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผศ.พิเชษฐ์ เวศนารัตน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.สุพรรณ สุตสนธ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์
ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์เกียรติ
ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัสมฤทธิ
ผศ.ดร.สวัสดี ภาระราช
ผศ.ดร.เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์

ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
ผศ.นริศ เจริญพร
รศ.ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง
รศ.ดร.มณฑล ศาสนนันท์
รศ.ดร.ศุภชัย สุรพันธ์

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์
ผศ.ดร.ชัชพล มงคลิก

ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล
ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร.จักรวาล คุณะติลก
ดร.ฤฎวัลย์ จันทรสา

ผศ.ดร.บรรหาญ ลิลา
รศ.เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณกุล

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผศ.ดร.กลางเดือน โพนนา
ผศ.ดร.ชเนศ รัตนวิไล
ผศ.ดร.รัฐชนา สินธวาลัย
ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์
อ.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์
รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
รศ.วนิดา รัตน์มณี
รศ.สมชาย ชูโณม

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อ.จิตลดา ชี้มเจริญ
อ.ทงศักดิ์ ทวีศรี
อ.นิศากร สมสุข

อ.อรอุมา กอสนาน
อ.อัญชลี สุพิทักษ์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ. ประยูร สุรินทร์

ผศ.ชัยพฤกษ์ อภาเวท

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.วิภู ศรีสืบสาย
ดร.อนิรุท ไชยจารุณิช
ดร.อุดม จันท์จรัสสุข
ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
ผศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

ผศ.ดร.สรรพลสิทธิ์ ลีมนรัตน์
ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
รศ.ดร.ฤดี มาสุขจันทร์
รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์
ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส
ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
ผศ. เจริญ ชุมมวล
ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
ผศ.สุรียา โชคสวัสดิ์
ผศ.อิศว ปัทมธรรมกุล

ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี
อ.ไท แสงเทียน
ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์
อ.ตะวันฉาย โพธิ์หอม
ดร.สันต์ โอพาพิริยกุล
ดร.ธารชуда พันธุ์นิกุล
อ.ล่อง ผโลดม
อ.สุรเจษฎ์ ก้อนจันทร์

**การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิพรอพิลีนกับ
อะลูมิเนียมออกไซด์ที่เหลือใช้จากกระบวนการหล่อล้อน้ำมันรถยนต์
Study on properties of Recycled Aluminum Oxide Filled
Polypropylene**

MAM 28

มนัส ศรีสวัสดิ์* และ กิตติพงษ์ กิมะพงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: manus_ie@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเศษวัสดุเหลือใช้ที่เกิดจากการผลิตอะลูมิเนียมได้แก่กากที่เหลือจากขบวนการผลิตอะลูมิเนียมซึ่งเรียกว่า ซีตะกันอะลูมิเนียม โดยนำกากอะลูมิเนียมดังกล่าวมาผ่านขบวนการทำให้บริสุทธิ์ เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจากนั้นนำมาบดเป็นผงด้วยเครื่องบดลดขนาดด้วยลูกบดจนได้ขนาด 200 เมช จากนั้นนำสารที่เตรียมได้ไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ โดยการนำมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดพอลิพรอพิลีน โดยขบวนการผสมแบบหลอมละลาย โดยใช้เครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิการผสม 220 องศาเซลเซียส รอบการผสม 40 รอบต่อนาที ใช้เวลาการผสม 5 นาที โดยการผสมสารตัวเติมที่เตรียมไว้ โดยใช้สัดส่วนการผสม 1, 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนัก จากการผสมพบว่าของผสมที่ได้มีสีเปลี่ยนเป็นสีเทา มีความแข็งมากขึ้น ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยการทดสอบแรงดึงพบว่าวัสดุผสมที่เตรียมได้มีความแข็งแรงมากขึ้น และมีค่ามอดูลัสมากขึ้น แต่มีการยืดตัวต่ำลง เมื่อนำไปทดสอบความแข็งพบว่ามีความแข็งมากขึ้น นอกจากนั้นเมื่อนำไปทดสอบความเป็นผลึกพบว่ามีความเป็นผลึกมากขึ้น ดังนั้นวัสดุผสมที่ได้มีสมบัติไปในทางที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้จะมาจากสมบัติของสารเสริมแรงที่ได้จากเศษวัสดุที่เหลือจากขบวนการผลิตอะลูมิเนียม ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นแนวทางการนำเศษวัสดุที่เหลือจากขบวนการอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์นอกจะได้วัสดุผสมชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ดีขึ้นจากเดิม ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะอุตสาหกรรมอีกด้วย

คำสำคัญ : อะลูมิเนียมออกไซด์, พอลิพรอพิลีน, วัสดุผสม, ซีตะกันอะลูมิเนียม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายมนัส ศรีสวัสดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	27 สิงหาคม 2526
ที่อยู่	3/184 ซอยดำรงสิทธิ์พัฒนา 3 แขวงคลองเตย เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร 10110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม อุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน
ผลงานวิจัยตีพิมพ์	มนัส ศรีสวัสดิ์, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, “การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน กับอลูมิเนียมออกไซด์ที่เหลือใช้จากกระบวนการหล่อล้อแม่กรดยนต์” การประชุมวิชาการช่างงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2553, 13 – 15 ตุลาคม 2553

