

การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้ในงานกรองน้ำ



นายณัฐวุฒิ พยัมศิริ
นายวิพุธ พรรณวดี

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เลขหม.....

เลขทะเบียน 40057

วัน, เดือน, ปี 24.0.0. 2543

b.....

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study of Additives Effects on Recycled
High Density Polyethylene for Water Filtration**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่นำกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้ในงานกรองน้ำ
โดย นายณัฐวุฒิ พษ์ขศิริ
นายวิพุธ พรรณวดี
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณกมลชัย
อ.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... หัวหน้าภาควิชาเคมี
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณกมลชัย)
คณะกรรมการสอบโครงการ
..... ประธานกรรมการ
(ดร.สุภารัตน์ จำปา)
..... กรรมการ
(ดร.จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์)
..... กรรมการ
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณกมลชัย)
..... กรรมการ
(อ.สุธา สุทธิเรืองวงศ์)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้ในงานกรองน้ำ		
นักศึกษา	นายณัฐวุฒิ	พยัมศิริ	รหัส 40052011
	นายวิพุธ	พรรณวดี	รหัส 40052052
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.สุชา	สุทธิเรืองวงศ์	
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2543		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อใช้ในงานกรองน้ำ โดยการผสมขบวนการพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกเคลือบด้วยกรดสเตียริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม และใช้ไฮโดรคาร์บอนาไมด์เป็นสารให้ฟองซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน วัสดุถูกผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัด (Compression molding machine) จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดการซึมผ่านของน้ำ ความหนาแน่น สมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ และสัณฐานวิทยา การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วน HDPE:CaCO₃ (60:40 70:30 และ 80:20) และปริมาณของ AZ (3% 5% และ 7%) ที่มีต่อสมบัติของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณของ AZ เท่ากับ 7% และอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ เท่ากับ 60:40 เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในกรอง โดยพิจารณาจากอัตราการซึมผ่านของน้ำซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการกรองเป็นอันดับแรก พบว่าชิ้นงานนี้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ดีและจากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าชิ้นงานมีรูพรุนขนาดสม่ำเสมอกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานส่งผลให้น้ำซึมผ่านได้ดี เมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกล พบว่ามีสมบัติเพียงพอที่จะใช้ในกรองทั่วไป แต่ต้องพัฒนาเพื่อให้ใช้ได้กับงานกรองที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น งานกรองที่ความดันสูงหรืองานกรองที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีบางประเภท

Special Project Title	Study of Additives Effects on Recycled High Density Polyethylene for Water Filtration	
Name	Mr. Nattawud	Payakasiri
	Mr. Viput	Phanawadee
Special Project Advisor	Asst.Prof. Somsak	Woramongconchai
	Mr. Sutha	Sutthiruangwong
Department	Chemistry	
Academic Year	2000	

Abstract

This special project is a study of additives effects on recycled high density polyethylene for water filtration. HDPE bottles were mixed with CaCO_3 , a filler, coated by stearic acid and Azodicarbonamide (AZ), a blowing agent, was added to make cellular structure. Materials were milled by a Two-roll mill and shaped by a compression molding machine. Specimens were investigated for water permeability, density, mechanical properties, water absorption, and morphology. The effects of HDPE to CaCO_3 proportion (80:20 70:30 and 60:40) and AZ content (3% 5% and 7%) were analysed. From the results, it was found that the amount of AZ at 7% and HDPE to CaCO_3 ratio at 60:40 were optimum for filtration application. By considering of water permeability, these variables indicated the priority of filtration effectiveness. According to morphology, studied by Scanning Electron Microscope (SEM), it could be observed that the specimens had uniform porosity showing good dispersion and they were suitable for water permeability. By considering mechanical properties, the specimens were good enough for general filtration, but they must be developed for specific filtration, e.g. high pressure filtration or chemical resistance filtration.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำจากบุคคล และองค์กรต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ อ.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ สั่งสอนและให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สุภารัตน์ จำปา และ ดร.จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแสวง เกิดประทุม นักวิชาการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้คำปรึกษาแก่คณะผู้จัดทำ

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท สุรินทร์ออมยา เคมิคอล จำกัด และบริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีที่ใช้ในโครงการพิเศษ

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท เอ็นเอส อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากซึ่งมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายณัฐวุฒิ พษ์ศิริ

นายวิพุธ พรรณวดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การกรอง	3
2.2 เทคนิคการผสมแห้ง	7
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	8
2.4 แคลเซียมคาร์บอเนต	10
2.5 สารให้ฟอง	14
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน	28
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	28
3.3 วิธีการทดลอง	29
3.3.1 การเตรียมส่วนผสม	29
3.3.2 การผสม	29
3.3.3 การขึ้นรูป	29

	หน้า
3.3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ	30
3.3.4.1 ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ	30
3.3.4.2 ทดสอบความหนาแน่น	30
3.3.4.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล	31
3.3.4.3.1 ความแข็งแรงโค้งงอ	31
3.3.4.3.2 ความทนทานต่อการขัดถู	31
3.3.4.3.3 ความแข็ง	31
3.3.4.4 ทดสอบการดูดซึมน้ำ	32
3.3.4.5 ทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	33
4.1 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำ	33
4.2 การศึกษาความหนาแน่น	34
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล	34
4.4 การดูดซึมน้ำ	36
4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา	37
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
ภาคผนวก	45
เอกสารอ้างอิง	48

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดของอนุภาคและวัสดุต่าง ๆ ที่กรองได้	3
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีน	18
ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black	19
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ - Methacryloxy – propyltrimethoxy silane	19
ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ - Aminopropyl – triethoxy silane	20
ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของ HDPE / CaCO ₃ คอมพอสิต	21
ตารางที่ 2.7 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO ₃	24
ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิพรอพิลีน	24
ตารางที่ 2.9 แสดงค่า Young's Modulus (E) และ Fracture Energy (G _c) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสมและไม่ได้ผสมด้วยสารตัวเติมที่อุณหภูมิห้อง	25
ตารางที่ 2.10 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสมและไม่ได้ผสมด้วย CaCO ₃	25
ตารางที่ 2.11 แสดงสรุปสมบัติเชิงกลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมต่างๆของสารเคมีที่ใช้	30
ตารางภาคผนวก	46

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	แสดงกลไกการกรอง	3
รูปที่ 2.2	แสดงการอุดตันผิวหน้าของชั้นสารกรองและแตกเป็นร่องลึกเข้าไปในชั้นสารกรอง	5
รูปที่ 2.3	แสดงการแตกแขนงบนผิวหน้าชั้นสารกรอง	6
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะการแตกของผิวหน้าชั้นสารกรองลึกลงไป 3 นิ้ว	6
รูปที่ 2.5	แสดงสูตรโครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE	9
รูปที่ 2.6	แสดงโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต	11
รูปที่ 2.7	แสดงเกรคของแคลเซียมคาร์บอเนต	11
รูปที่ 2.8 a)	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Falling weight impact strength กับปริมาณสารตัวเติม	13
รูปที่ 2.8 b)	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Notched izod impact strength กับปริมาณสารตัวเติม	13
รูปที่ 2.9	แสดงเครื่องย่อยพลาสติกแบบต่าง ๆ	15
รูปที่ 2.10	แสดงภาคตัดขวางของเครื่องไม้คัต	16
รูปที่ 2.11	แสดงทิศทางการหมุนของลูกกลิ้ง	17
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสของ HDPE ที่ผสมด้วยไมก้า (E_m) และ LDPE (E) กับ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (V_p)	22
รูปที่ 2.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสของ LDPE ที่ผสมด้วยไมก้า (E_m) และ LDPE (E) กับ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (V_p)	22
รูปที่ 3.1	แสดงเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำ	30
รูปที่ 4.1	อัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO ₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%	33
รูปที่ 4.2	ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO ₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%	34
รูปที่ 4.3	ความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO ₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%	35
รูปที่ 4.4	ความทนทานต่อการขีดถูของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO ₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%	35
รูปที่ 4.5	ความแข็งของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO ₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

สถานการณ์ปัจจุบันเกี่ยวกับปัญหามลพิษและสิ่งแวดล้อมกำลังทวีความรุนแรงขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาขยะมูลฝอยจากแหล่งต่าง ๆ พบว่าในปี พ.ศ. 2535 และปี 2539 มีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นทั่วประเทศ 25,940 และ 39,872 ตัน / วัน [1]

ปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือปัญหาทรัพยากรที่ลดน้อยลงคือในขณะนี้ประเทศไทยกำลังพัฒนาด้านอุตสาหกรรมจึงทำให้เกิดความต้องการปริมาณวัตถุดิบสูง และมีการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศปริมาณมาก แต่ในประเทศกลับมีการทิ้งขยะมูลฝอยบางชนิดบางประเภทที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบใหม่หรือมูลฝอยที่สามารถนำมาใช้ได้ ส่งผลให้ทรัพยากรลดน้อยลงและใช้ทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้สูญเสียเงินตราโดยไร้ประโยชน์และเกิดปัญหาขยะล้นเมือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นทุกวัน

แนวทางหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การนำพลาสติกกลับมาขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง (Recycle) ในงานวิจัยนี้เป็นการนำขวดน้ำพลาสติกชนิดขุ่น (High Density Polyethylene , HDPE) ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และสารให้ฟอง (Azodicarbonamide) แล้วนำมาทำเป็นแผ่นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานกรอง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้ในงานกรองน้ำ
- 1.2.2 เพื่อลดปริมาณขยะพลาสติกและนำกลับมาใช้ใหม่ให้เป็นประโยชน์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาปริมาณสารให้ฟอง (Azodicarbonamide) และสารตัวเติม (CaCO_3) ที่เหมาะสม ในการผลิตชั้นกรอง (Filter Media)
- 1.3.2 ศึกษาเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูปชิ้นงาน
- 1.3.3 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงานที่ได้
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ชั้นกรองที่สามารถกรองอนุภาคได้ในระดับไมครอน
- 1.4.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ (ขวดน้ำ HDPE) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ สารให้ฟอง (Azodicarbonamide) ที่จะทำให้ได้การซึมผ่านของน้ำ และ สมบัติเชิงกลที่ดี
- 1.4.3 เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกรอง (Filter Media)

การกรองเป็นกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีสำหรับขจัดหรือแยกสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ที่มีสภาพเป็นของแข็งแขวนลอย และพวกจุลชีพต่าง ๆ เช่น แอลจี แบคทีเรีย สาหร่าย ไวรัส สี แมงกานีส และ เหล็กที่ถูกรอกออกซิไดส์ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำ หรือเป็นตะกอนที่เกิดจากผลของกระบวนการจับตัวและรวมตัวตกตะกอน น้ำที่เข้ากรองจะไหลผ่านช่องว่างของสารกรอง (Filter Media) ซึ่งจะดักจับสารต่าง ๆ ไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดของอนุภาคและวัสดุต่าง ๆ ที่กรองได้

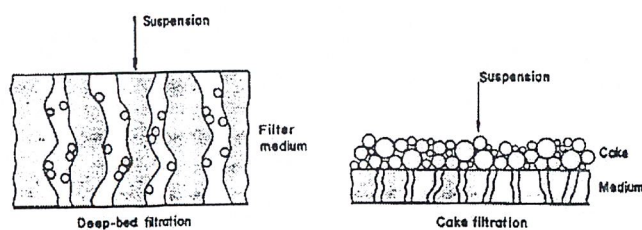
วัสดุต่างๆที่กรองได้	ขนาด (มิลลิเมตร)
ตะกอนต่างๆ	50,000
แบคทีเรีย	5,000
ไวรัส	50
อนุภาคคอลลอยด์	1 - 1,000

2.1.1 กลไกของการกรอง

การกรอง คือการดักอนุภาคหรือตะกอนต่าง ๆ ไว้ด้วยวิธีการทางกายภาพ หรือ ทางเคมี การกรองที่มีประสิทธิภาพจะมีทั้ง การทำให้อนุภาคไม่เสถียร (Particle Destabilization) และ การขนถ่ายอนุภาค (Particle Transport) ซึ่งเป็นกลไกที่คล้ายคลึงกับการรวมตัว (Coagulation)

กลไกของการกรองมีอยู่ 2 แบบ (รูปที่ 2.1) คือ

1. Deep Bed Filtration
2. Cake Filtration



รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการกรอง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการกรองทุกรูปแบบ น้ำจะต้องมีแรงดันมากพอที่จะไหลผ่านชั้นสารกรองได้ การกรองแบบ Deep Bed เกิดขึ้นเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นสารกรอง (Filter Bed) ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ที่จะดักจับอนุภาคต่าง ๆ ไว้ภายในช่องว่าง เมื่อจับอนุภาคต่าง ๆ ไว้มากจนเต็มช่องว่างแล้ว จะเกิดเป็นชั้นตะกอน (Cake) อยู่บนผิวหน้าของชั้นสารกรอง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นกรองไปด้วย (Cake Filtration) แต่เนื่องจากชั้นตะกอนที่จับอยู่นั้นมีเนื้อแน่นมากจึงทำให้น้ำไหลผ่านได้ยาก มีการสูญเสียความดัน (Head Loss) สูง ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่พึงปรารถนาในการกรอง เมื่อการสูญเสียความดันเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกรองจะลดลงอย่างมาก ต้องทำการล้างกลับ (Back Washing) เพื่อทำความสะอาดชั้นสารกรอง

ชั้นสารกรองทำหน้าที่ในการกรอง 3 ประเภทดังนี้

1. ดักอนุภาคและตะกอนต่าง ๆ ไว้ในช่องว่างระหว่างเม็ดสารกรองที่เรียงตัวอยู่เป็นชั้นกรอง
2. โดยการที่อนุภาคหรือตะกอนต่าง ๆ ไปตกค้างบนสารกรอง หรือบนชั้นของตะกอนที่ถูกดักไว้แล้ว ในเมื่อปริมาณอนุภาคหรือตะกอนมีมากเกินไปที่ช่องว่างในชั้นกรองจะดักไว้
3. ดักอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ ไว้โดยวิธีการดูดซับ (Absorption) การใช้สารกรองช่วยกรอง (Filter aid) จะเคลือบเม็ดสารกรองไว้ ช่วยให้อุดจับอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยยืดเวลาการกรองให้นานขึ้นเพราะชั้นสารกรองจะอุดตันช้าลง ประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นกับขนาดของเม็ดสารกรอง ขนาดของอนุภาคและอนุภาคที่จับตัวรวมกันเป็นตะกอนเล็กๆ (ฟล็อก, Floc) ลักษณะการยึดติด (Adhesive) และความทนทานต่อแรงเฉือน (Shearing Strength) ของฟล็อก นอกจากนี้ยังขึ้นกับสมบัติของอนุภาคน้ำและสารกรองด้วย สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ แรงแวนเดอร์วาล กับ แรงเคมีทางไฟฟ้า (Electrochemical Force)

2.1.2 หลักของการกรอง

น้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วจะมีพวกอนุภาคเล็ก ๆ และอนุภาคที่จับตัวรวมกันเป็นตะกอนเล็ก ๆ (ฟล็อก) ซึ่งจะเข้ามาในเครื่องกรอง เพราะฟล็อกขนาดใหญ่จะตกตะกอนเกือบหมด พวกอนุภาคและตะกอนเหล่านี้จะแทรกผ่านเข้าไปในช่องว่างของชั้นสารกรองในระดับผิวหน้าเท่านั้น เมื่ออนุภาคและตะกอนเหล่านี้ไปอุดอยู่ในสารกรอง อัตราการไหลผ่านสารกรองจะลดลง ซึ่งทำให้ตะกอนทั้งหลายมาพอกพูนเกาะบนพื้นผิวส่วนบนของชั้นสารกรองมากขึ้น การอุดตันของสารกรองนี้ ไซ้ว่าจะเกิดขึ้นสม่ำเสมอตลอดทั้งผิวหน้าเสมอไป บริเวณไหนที่อุดตันน้อยกว่า น้ำจะไหลกรองผ่านได้มากกว่า อนุภาคและตะกอนจะแทรกเข้าไปในสารกรองได้ลึกไม่เกิน 2-4 นิ้ว เพราะฉะนั้นการกรองจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าลึกเพียง 1-2 นิ้วเท่านั้น พวกตะกอนเล็ก ๆ ที่ไปเกาะอยู่ในช่องว่างของสารกรองจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองสำหรับอนุภาคเล็ก ๆ อื่น ๆ ต่อไปอีก จึงจำเป็นต้องคัดเลือกสารกรองที่มีขนาดโตพอเหมาะ เพื่อให้ตะกอนต่าง ๆ สามารถแทรกตัวลงในเนื้อสารกรองได้บ้างในระยะ 2-4 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าตะกอนแทรกตัวลงไปในการกรองไม่ได้เลยจะตกค้างบนผิวหน้าซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรอง ลดต่ำลง เพราะจะทำให้แรงดันที่ต้องใช้ในการกรองเพิ่มขึ้น (Head Loss เพิ่ม) ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำงานในการกรองน้ำจะลดลง

2.1.3 สารกรอง (Filter Media)

สารกรองที่มีคุณสมบัติในการกรองที่ดี ควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ป้องกันไม่ให้ตะกอนหรืออนุภาคแขวนลอย (Suspended Matter) ไหลผ่านสารกรองได้
2. ดักและจับตะกอนหรืออนุภาคแขวนลอยเหล่านี้ไว้อย่างพอเหมาะ เพื่อจะได้ง่ายในการล้างกลับ
3. สามารถดักจับตะกอนหรืออนุภาคแขวนลอยไว้ได้มากที่สุด โดยไม่อุดตันได้ง่าย

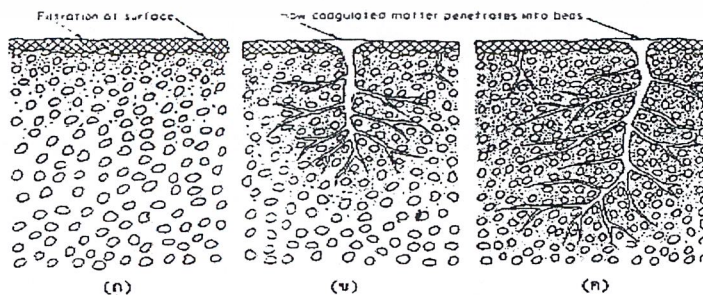
2.1.4 ความสามารถในการดักจับตะกอน

ความสามารถที่ชั้นสารกรองในเครื่องกรองจะดักจับอนุภาคและตะกอนไว้ได้โดยมี Head Loss คงที่ค่าหนึ่งในการใช้งาน มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร เรียกว่า ความสามารถในการดักจับตะกอน เช่น เครื่องกรองแบบมีแรงดันแบบไหลลงและใช้สารกรองตามปกติจะมีความจุในการจับอนุภาคของแข็งสูงถึง 28 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ฉะนั้น ความสามารถในการดักจับตะกอนจึงขึ้นกับชนิดของสารกรอง การเรียงตัวของชั้นสารกรองและทิศทางการไหลของน้ำ ความสามารถในการดักจับตะกอนนี้จะลดลงได้ถ้าหากมีการเกิดตะไคร่หรือเมือกเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จับบนเม็ดสารกรอง จะทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดสารกรองลดลง

2.1.5 ปัญหาในการกรอง

1. การอุดตันผิวหน้าสารกรองและการแตกแขนงของผิวหน้า

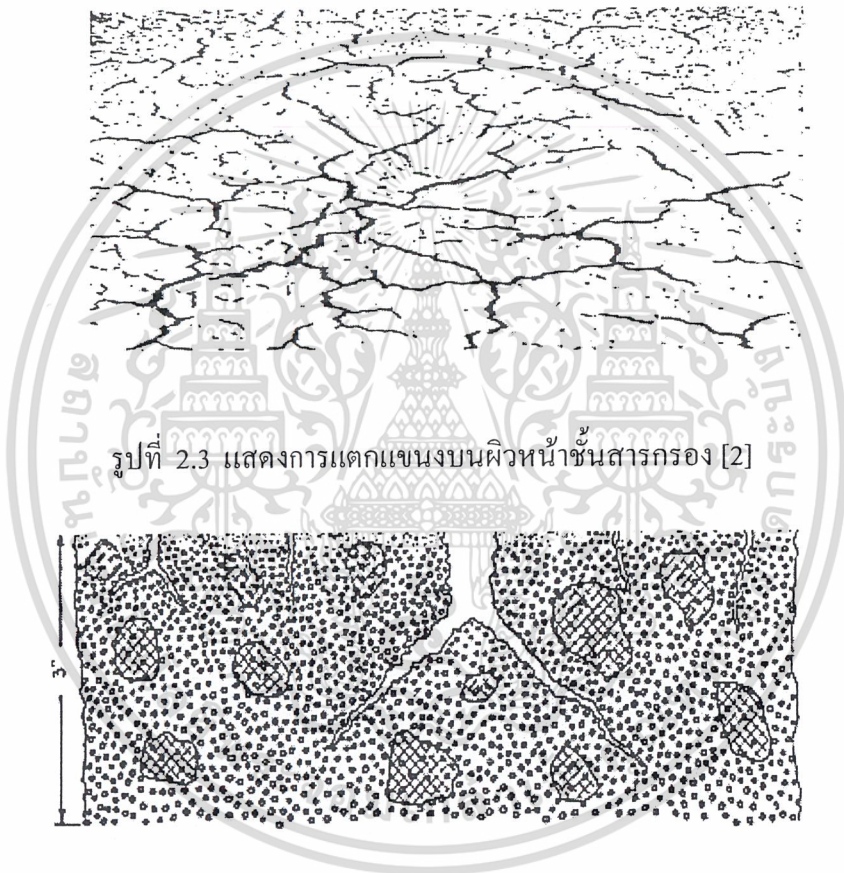
ในการกรอง ถ้าหากสารกรองมีขนาดเล็ก หรือตะกอนแขวนลอยและฟล็อกมีความเหนียวมาก ไม่แตกสลายง่าย การแทรกตัวของฟล็อกเข้าไปในเนื้อสารกรองจะเกิดได้น้อย ปกติฟล็อกจะมีขนาดตั้งแต่ 2 มิลลิเมตรจนถึงขนาดที่เล็กกว่า 0.1 มิลลิเมตร สารกรองที่มีรูปร่างกลม เช่น เม็ดทรายที่มีขนาด 0.5 มิลลิเมตร จะมีขนาดช่องว่าง 0.1-0.2 มิลลิเมตร ถ้าเป็นสารกรองเม็ดใหญ่ เช่น ถ่านแอนทราไซต์ 1.2 มิลลิเมตร ช่องว่างจะมีขนาด 0.3-0.6 มิลลิเมตร (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 แสดงการอุดตันผิวหน้าของชั้นสารกรองและแตกเป็นร่องลึกเข้าไปในชั้นสารกรอง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.2 (ก) แสดงถึงลักษณะการกรองที่ฟล็อกไปตกค้างอยู่บนผิวหน้าสารกรองเป็นส่วนใหญ่เพราะฟล็อกมีขนาดใหญ่ และแตกออกเป็นฟล็อกเล็ก ๆ ยาก การกรองจะเป็นแบบ Cake Filtration ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำ เครื่องกรองจะอุดตันเร็ว ระยะเวลาการใช้งานกรองจะสั้น ส่วนในรูปที่ 2.2 (ข) และ รูปที่ 2.2 (ค) จะเป็นกรณีที่ฟล็อกและตะกอนต่าง ๆ แทรกตัวเข้าไปในเนื้อสารกรองได้บ้าง การกรองเริ่มมีลักษณะของ Deep Bed Filtration แต่ก็มีส่วนที่มีลักษณะเป็น Cake Filtration ถ้าใช้สารกรองผสมหรือสารกรองคู่ ปัญหาในการอุดตันผิวหน้าจะลดน้อยลงมากเพราะสารกรองมีช่องว่างมากกว่า ในกรณีที่เกิดสภาพ Cake Filtration นั้น ผิวหน้าของชั้นสารกรองจะเกิดการแตกแขนงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงการแตกแขนงบนผิวหน้าชั้นสารกรอง [2]

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการแตกของผิวหน้าชั้นสารกรองลึกลงไป 3 นิ้ว [2]

2. ระยะเวลาใช้งานกรองสั้น เนื่องจากมี Head Loss เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

การที่เครื่องกรองมีการสูญเสียความดันเพิ่มมากขึ้น เพราะมีการเพิ่มปริมาณของแข็งขึ้น เช่น ในบางช่วง น้ำที่เข้ากรองจะมีความขุ่นมากกว่าปกติมาก แต่ความสามารถในการดักจับตะกอนของชั้นสารกรองยังคงเดิม ทำให้ชั้นสารกรองอุดตันได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้การเกิดตะไคร่หรือเมือกจับบนเม็ดสารกรองทำให้ชั้นสารกรองมี Head Loss เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

3. น้ำที่กรองมีความขุ่นติดออกมา

ในบางครั้งถ้าฟล็อกหรือตะกอนแทรกตัวลงไปใ้เนื้อสารกรองได้ลึกมากเกินไป มีโอกาสที่จะหลุดไปกับน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว ทำให้คุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองต่ำกว่าพิคัดที่ต้องการ และอายุการใช้งานกรองจะสั้นด้วย การแก้ปัญหาทำได้โดยเปลี่ยนชนิดของสารกรองให้เหมาะสมกับสภาพการกรอง

4. มีเศษดิน โคลน (Mud Balls) อยู่บนผิวหน้าของชั้นสารกรอง

ในบางครั้งเนื่องจากการทำความสะอาดสารกรองไม่ดีพอ พวกตะกอนต่าง ๆ ที่กรองไว้บนผิวหน้าสารกรอง จะมีสภาพเป็นโคลนหรือเศษดิน ซึ่งจะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ในการล้างกลับเมื่อดินโคลนเหล่านี้จะแทรกตัวจมอยู่ในชั้นสารกรอง ทำให้ชั้นสารกรองมีการอุดตัน (Clogged) เป็นบริเวณเฉพาะแห่ง ซึ่งการอุดตันนี้จะทำให้ชั้นสารกรองมีการหดตัวและแตกแยกออกได้ ในขณะที่เดียวกันมี Head Loss เพิ่มขึ้นด้วย

5. มีทรายรั่วไปกับน้ำกรอง

ในบางครั้งชั้นกรวดทรายที่รองรับชั้นทรายอยู่ อาจจะมีการเคลื่อนที่หรือมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งทรายไปปนอยู่ในชั้นกรวด และรั่วไหลออกไปกับทางออกของน้ำกรองได้ ถ้ามีการรั่วไหลของทราย ต้องหาชั้นกรวดที่มีขนาดเหมาะสมมาเป็นชั้นรองรับชั้นทราย

6. การสูญเสียสารกรอง

ถ้าหากชั้นบนสุดของชั้นสารกรองเป็นแอคทีฟคาร์บอนหรือถ่าน (Activated Carbon) ในการล้างกลับ ถ้าอัตราการไหลของน้ำล้างกลับสูง ชั้นสารกรองจะขยายตัวมาก โอกาสที่ถ่านจะหลุดลอยไปกับน้ำล้างกลับมีมากเนื่องจากมีน้ำหนักเบา วิธีการแก้ไขให้ขยายระยะระหว่างระดับบนสุดของชั้นสารกรองที่ขยายตัวแล้วให้เพิ่มขึ้น คือห่างจากท่อบนสุดมากยิ่งขึ้น หรือลดอัตราการล้างกลับลงและใช้อากาศช่วยเป่ากวนในขณะที่ล้างกลับ 1-2 นาที [2]

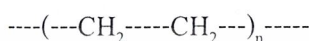
2.2 เทคนิคการผสมแห้ง (Dry Blending)

การผสม คือ การนำวัสดุต่างชนิดกันมารวมกันและเฉลี่ยให้เข้ากัน โดยการให้วัสดุเคลื่อนที่คลุกเคล้ากันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการ การผสมสูตรของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปร่างของพอลิเมอร์ และสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผสมรวมทั้งขึ้นอยู่กับกระบวนการขึ้นรูปและเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ เครื่องจักรที่ใช้ในการผสมสามารถแบ่งได้ตามกำลัง หรือขนาดของแรงที่ใช้ในการเนียน และลักษณะของกระบวนการผลิตว่าเป็นแบบครั้ง (Batch Process) หรือเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรแบ่งได้ดังนี้

2.3.3 คุณสมบัติทั่วไป

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงและมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานทางเคมีสูง และไม่ดูดซึมของผสม ซึ่งจัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี โดยทำการประยุกต์ใช้ในเครื่องของบรรจุภัณฑ์ มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลางถึงสูง จะมีสมบัติด้านความทนทานต่อแรงกระแทกดีมาก มีสูตรโครงสร้างดัง

รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงสูตรโครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE

สมบัติเฉพาะของ HDPE แต่ละชนิดจะขึ้นกับ 4 ตัวแปร คือ ความหนาแน่น น้ำหนักโมเลกุล (MW) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) และสารเติมแต่ง ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาคุณสมบัติของ HDPE โดย HDPE จะมีความหนาแน่นมากกว่า 0.940 g/cm^3 ส่วนพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) จะอยู่ในช่วง $0.926 - 0.940$ โสโมพอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูงสุด มีความแข็งตึง (Stiffness) และสมบัติป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) ที่ดีมาก แต่โดยทั่วไปจะให้ค่าความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ต่ำ (ESCR) คือ ความสามารถในการต้านทานการแตกหักอันเป็นผลมาจากความเค้นทางกล หรือ ทางเคมี) โดยปกติความหนาแน่นสูงกว่า จะปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งตึง (Stiffness) และความแข็ง (Hardness) และสมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิที่เบี่ยงเบนทางความร้อน (Heat distortion temperature) และสมบัติป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) เช่น ก๊าซหรือไอน้ำ (Water vapor transmission) ส่วนที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจะปรับปรุงสมบัติทางด้านความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และความสามารถในการต้านทานการแตกหักเนื่องจากสภาพแวดล้อม [4]

- น้ำหนักโมเลกุล (MW)

ปกติ HDPE จะมี MW อยู่ในช่วง $40,000 - 300,000$ ซึ่งมีค่า Melt Flow index (MI) อยู่ในช่วง $0.02 - 100 \text{ g} / 10 \text{ min}$ โดยค่า MW จะมีผลต่อค่า MI เนื่องจากความหนืดที่แตกต่างกันคือ ถ้าค่า MW สูงแล้วความหนืดสูง ทำให้ MI ต่ำ และถ้าค่า MW ต่ำแล้วความหนืดต่ำทำให้ MI สูง ค่า MW ที่สูงกว่า (MI ต่ำกว่า) จะปรับปรุงความทนต่อการหลอมเหลว (Melt strength) ทำให้ความเหนียว (Toughness) ดีกว่า และความสามารถในการต้านทานการแตกหักเนื่องจากสภาพแวดล้อม ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงกว่า อย่างไรก็ตาม MW ที่สูงกว่าจะทำให้เวลานำไปใช้งานต้องใช้อุณหภูมิหรือความดันสูงตามด้วย [4]

- การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

MWD ของพอลิเอทิลีนจะอยู่ในช่วงแคบถึงกว้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการที่ใช้ HDPE ที่มี MWD ที่แคบจะให้การโค้งงอ (Warping) ที่ต่ำ และค่าความทนต่อแรงกระแทกสูง ส่วน MWD อยู่ในช่วงปานกลางถึงกว้าง จะให้ Processability ที่ดีกว่าในกระบวนการอัดรีด สำหรับ HDPE ที่มี MWD อยู่ในช่วงกว้างจะปรับปรุง Melt strength และความต้านทานต่อการคืบได้ดี [4]

- สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งที่ใช้อาจใช้ Antioxidants เพื่อป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์ในระหว่างอยู่ในกระบวนการขึ้นรูป และในระหว่างการใช้งาน หรือใช้ UV stabilizer เพื่อป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น สารตัวเติม (Fillers) เพื่อลดต้นทุนการผลิต สารเสริมแรง (Reinforcement) ปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารช่วยให้พอง (Blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) เป็นต้น [4]

2.3.4 กระบวนการและการประยุกต์ใช้งาน

HDPE ถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ภาชนะ บรรจุภัณฑ์ แก้ว โต้ะ ขวด และอุปกรณ์ต่างๆ โดยผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) การหมุนขึ้นรูป (Rotational molding) การรีดกึ่ง (Calendering) การขึ้นรูปร้อน (Thermoforming) ซึ่งปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติก และภาชนะบรรจุของอื่น ๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรด และเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัว และของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อห่อหุ้มของ และอาหาร กระจกพลาสติก (กระจกร้อน) หุ้มสายไฟฟ้า ทำสายยาง และอื่น ๆ HDPE สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยนำมาผ่านกระบวนการใหม่ เช่น นำมาใช้ทำขวดน้ำดื่ม เป็นต้น [4]

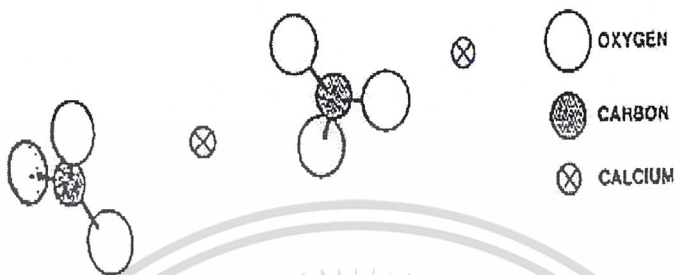
2.4 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

2.4.1 ความเป็นมา

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแร่ธาตุที่มีอยู่อย่างสมบูรณ์บนเปลือกโลก แต่ในอุตสาหกรรมมีการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ จากทั้งหมด แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติก ซึ่งมีหลายชื่อโดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น Marble , Limestone , Coral , Shell และ Chalk แบ่งตามโครงสร้างผลึก เช่น Calcite และ Aragonite และ เมื่อมีแมกนีเซียม-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ประการใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

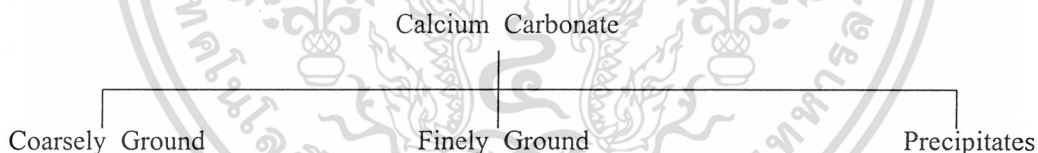
คาร์บอเนตอยู่ในโครงสร้างจะเรียก Dolomite ($\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$) แคลเซียมคาร์บอเนตถูกใช้เป็นสารตัวเติม อย่างกว้างขวาง เนื่องจากความขาว มีการสึกกร่อนน้อย มีหลายขนาดอนุภาค ราคาถูก แคลเซียมคาร์บอเนตมีโครงสร้าง 2 แบบ คือ Alternating calcium cations และ Trigonal planner carbonate anions [5] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

2.4.2 การผลิต

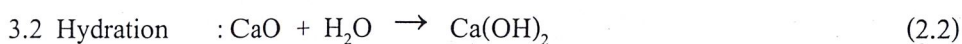
ในทางการค้าได้มีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต 3 เกรดใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกคือแบบบดหยาบ (Coarsely ground), แบบบดละเอียด (Finely ground) และแบบตกตะกอน (Precipitates) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงเกรดของแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตมี 3 วิธี คือ

1. Solvay Process (Na_2CO_3)
 2. Sodium Hydroxide Process
- ทั้งสองวิธีนี้จะได้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม
3. Carbonation Process เป็นวิธีง่ายและได้แคลเซียมคาร์บอเนตโดยตรงมี 3 ขั้นตอน



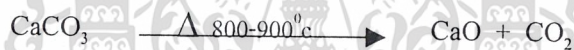
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเริ่มจากการคัดหินชั้นไลม์สโตน ที่อุณหภูมิประมาณ 900°C จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ และ Quick lime หลังจากนั้นทำการแยกให้บริสุทธิ์ขึ้น Quick lime จะกลายเป็นสารแขวนลอยของหินปูน (Milk of lime) และน้ำ ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารแขวนลอยของหินปูนจะได้แคลเซียมคาร์บอเนต โดยแยกขนาดอนุภาคด้วยการกรองโดยมี Rotary Vacuum filter และ Pressure filter ช่วยในการกำจัดน้ำ หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยใช้ Rotary Tunnel Spray หรือ

Flash dryers ในกระบวนการนี้จะได้แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปของ Aragonite มีขนาดอนุภาค 0.2 ถึง 2.0 ไมครอน ซึ่งสภาวะของปฏิกิริยาจะมีผลต่อขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยถ้ามีความชื้นมากเกินไปจะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ไม่ดี [5]

2.4.3 คุณสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนตประกอบด้วย แคลเซียม 40 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน 12 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 48 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะอุณหภูมิ $800 - 900^{\circ}\text{C}$ แคลเซียมคาร์บอเนตจะแตกตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ



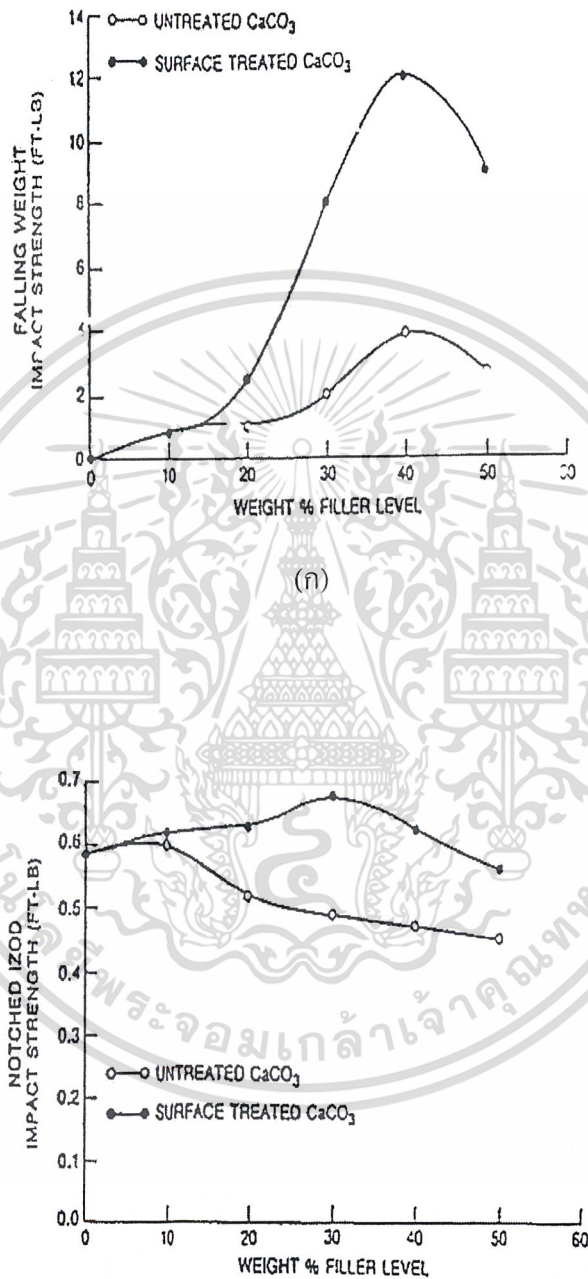
ข้อเสียของแคลเซียมคาร์บอเนตคือสามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้ แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถปรับปรุงพื้นผิวได้โดยใช้เมทัลลิกสเตียเรท ซึ่งจะช่วยให้การกระจายตัวในพลาสติก และลดการจับตัวเป็นก้อน สเตียเรทจะไม่ทำปฏิกิริยากับพลาสติกแต่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกายภาพ (Physical strength) โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณสเตียเรท 0.5 ถึง 1.2 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้ามีพื้นที่ผิวสูงเช่นในแบบตกตะกอน (Precipitate grade) อาจจะใช้ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ถูกจัดว่าเป็นสารที่อันตรายต่อสุขภาพ ไม่ติดไฟ และไม่จุลระเบิด แคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์สูงจะสามารถใช้เติมแต่งในอาหาร เช่น โซดาไฟ โซเดียมไบคาร์บอเนต และใช้ในอาหารสัตว์ ปัญหาของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดปัญหาด้านฝุ่น เพราะฉะนั้นจึงควรป้องกันสายตาเพื่อไม่ให้สัมผัสฝุ่นที่เกิดจากแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

2.4.4 การประยุกต์ใช้งาน

แคลเซียมคาร์บอเนตนิยมใช้กับพอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีนเพื่อลดต้นทุน แคลเซียมคาร์บอเนตแบบบด นิยมใช้เติมลงในพอลิเอทิลีน ซึ่งสมบัติเชิงกลบางประการจะลดลง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิพรอพิลีนในช่วง 20 – 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกแต่ลดสมบัติการโค้งงอ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตได้รับการปรับปรุงพื้นผิว ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตแบบบดละเอียด จะมีการกระจายตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิพรอพิลีนได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวและแบบหยาบ ซึ่งจะมีผลต่อความทนทานต่อแรงกระแทก ดังรูปที่ 2.8



(ข)

รูปที่ 2.8 ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Falling weight impact strength กับปริมาณสารตัวเติม [5]

ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Notched izod impact strength กับปริมาณสารตัวเติม [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สารให้ฟอง (Blowing agent) [6]

สารให้ฟองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

1. สารที่ทำให้เกิดฟองทางกายภาพ (Physical blowing agent) จะสามารถเกิดฟองก๊าซได้ โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนสถานะ เช่น ของเหลวที่ถูกทำให้ระเหยกลายเป็นก๊าซแทรกตัวเข้าไปในพอลิเมอร์ภายใต้ความดันสูง
2. สารที่ทำให้เกิดฟองทางเคมี (Chemical blowing agent) จะสามารถทำให้เกิดฟองก๊าซจากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition)

สารที่ทำให้เกิดฟองควรมีสมบัติดังนี้

1. ในสภาวะการใช้งานปกติมีความเสถียร
2. เกิดฟองก๊าซในเวลาและอุณหภูมิที่ต้องการ
3. มีความเป็นพิษน้อย
4. ไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของกระบวนการผลิตและสมบัติของพอลิเมอร์
5. สามารถผลิตฟองก๊าซได้ในขนาดที่เท่า ๆ กัน

เอโซไดคาร์โบนาไมด์จัดเป็นสารที่ทำให้เกิดฟองทางเคมีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยอุณหภูมิที่เอโซไดคาร์โบนาไมด์จะเกิดการสลายตัวให้ฟองก๊าซอยู่ในช่วง $195 - 216^{\circ}\text{C}$ จะสามารถให้ก๊าซประมาณ 220 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ซึ่งเอโซไดคาร์โบนาไมด์จะไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี ไม่ทำให้เกิดการเผาไหม้ สามารถทำให้เกิดการสลายตัวได้ง่ายโดยอนุภาคขนาดเล็กจะสลายตัวได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

ปฏิกิริยาการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์แสดงได้ดังนี้



ที่อุณหภูมิ 190°C เอโซไดคาร์โบนาไมด์จะผลิตก๊าซออกมาประมาณ 32 เปอร์เซ็นต์ โดยประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน 65 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 31.5 เปอร์เซ็นต์ และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

2.6.1 เครื่องย่อยพลาสติก

การย่อยพลาสติก หมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยวิธีกล ในการย่อยจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็กแตกต่างกันตามต้องการ

ถ้าต้องการแยกพลาสติกเม็ดหยาบออกจากเม็ดละเอียดเพื่อสามารถทำงานในขั้นต่อไปได้สะดวกยิ่งขึ้น ต้องมีการกรองประกอบเข้าไปด้วย

เหตุผลที่จำเป็นต้องย่อยพลาสติกมีหลายประการ เช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสม ทำให้อบแห้งได้ดี ป้อนเข้าเครื่องได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายเร็ว เป็นต้น เครื่องย่อยมีหลายชนิด ซึ่งสร้างไว้ให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก ตัวอย่างเครื่องย่อย เช่น เครื่องรีดย่อย เครื่องโม่ตี เครื่องโม่กวน เครื่องโม่ตัด เครื่องโม่แท่งดี และเครื่องโม่รีด

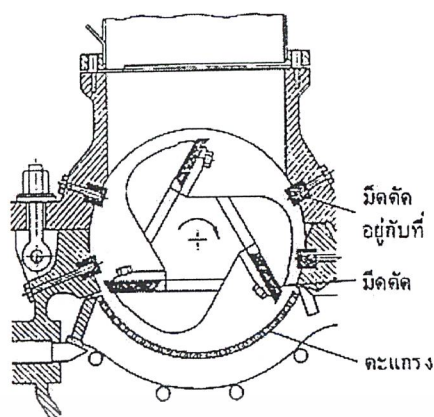
เครื่องรีดย่อยจะใช้สำหรับการย่อยพลาสติกแข็งเปราะได้เท่านั้น สำหรับการย่อยจะต้องใช้เครื่องโม่บด ในการที่จะเลือกใช้เครื่องโม่ชนิดใดขึ้นอยู่กับว่าต้องการความละเอียด หรือความสม่ำเสมอของเม็ดพลาสติกขนาดไหน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เครื่อง	เครื่องรีดย่อย	โม่ตี	โม่ตัด	โม่แท่งดี
สภาพของพลาสติก				
เปราะ				
เหนียว				
elastic				
เหมาะสมสำหรับ	PS, PF	PS, PF, PMMA	PVC, PE, PP, PA	PVC, PE, PF

รูปที่ 2.9 แสดงเครื่องย่อยพลาสติกแบบต่าง ๆ [7]

ลักษณะการทำงานของเครื่องย่อยต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.9 แตกต่างกันดังเช่นเครื่องรีดย่อยใช้แรงอัด เครื่องโม่ตัดใช้การตัดเฉือนและเครื่องโม่แท่งดีใช้การตีให้กระจายและการเสียดสี

เนื่องจากเครื่องโม่ตัดใช้มากในการย่อยพลาสติกโดยเฉพาะอย่างยิ่งจะใช้ในการย่อยเศษพลาสติกหรือชิ้นงานที่เสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

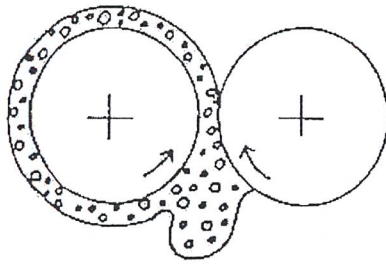


รูปที่ 2.10 แสดงภาคตัดขวางของเครื่องไม้ตัด [7]

จากรูปที่ 2.10 เป็นเครื่องไม้ตัดซึ่งประกอบด้วยเรือนเหล็กหล่อที่มั่นคง มีมิดดิลติดอยู่กับเรือน 4 คม ตอนล่างจะมีตะแกรงประกอบอยู่ วัสดุที่จะตัดส่งเข้าทางปล่องข้างบน ตรงกลางจะมีเพลลาซึ่งมีมิดดิลติดอยู่ 3 เล่ม เศษพลาสติกที่ใส่ลงไปจะถูกมิดหมุนจับ และนำไปตัดกับมิดซึ่งติดอยู่กับเรือนเครื่อง โดยเครื่องจะทำงานช้า ๆ ไปจนกว่าพลาสติกจะละเอียดพอที่จะลอดตะแกรงได้ 0.5 mm เครื่องไม้ตัดมีขนาดทำงานได้ตั้งแต่ 10 kg/h จนถึง 2,500 kg/h

2.6.2 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 1 คู่ วางในแนวนอน โดยจะเกิดช่องว่าง (gap) ระหว่างลูกกลิ้ง พอลิเมอร์และสารเติมแต่งจะทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear) สูงบริเวณช่องว่าง (gap) เมื่อลูกกลิ้งหมุนในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งอาจจะเหมือนหรือต่างกันได้ตามอัตราส่วนที่เปลี่ยนไป ตั้งแต่ 1/1.1 ถึง 1/1.4 ผลของการผสมละเอียดพอสมควร แต่ต่ำกว่าการมองแยกด้วยสายตา การผสมจะดีในทิศทางตามเครื่อง แต่ไม่ดีในทิศขวาง (ตามความยาวของลูกกลิ้ง) ดังนั้น เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งนี้ดีต่อการผสมแบบกระจาย (Dispersive mixing) แต่ไม่ดีสำหรับการผสมแบบแจกจ่าย (Distributive mixing)



รูปที่ 2.11 แสดงทิศทางการหมุนของลูกกลิ้ง [8]

ในการใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งเพื่อการผสมนี้ จะต้องนำพอลิเมอร์ใส่ลงในช่องว่าง (gap) ระหว่างลูกกลิ้ง ทั้งไว้สักครู่ จนกระทั่งอุณหภูมิ นุ่มขึ้นและเกิดเป็นแถบเรียบรอบลูกกลิ้ง ก่อนการผสมแถบเรียบรอบลูกกลิ้งจะเกิดที่ลูกกลิ้งใดขึ้นอยู่กับสมบัติของพอลิเมอร์ แต่ส่วนมากมักอยู่รอบลูกกลิ้งที่ร้อนกว่าหรือเร็วกว่า

ลูกกลิ้งจะถูกยกในลักษณะที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้สามารถปรับความกว้างของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งได้ในตอนแรก ถ้าพอลิเมอร์พันเป็นแถบรอบลูกกลิ้ง (Band) โดยเหลือพอลิเมอร์ (B) เล็กน้อยที่ไม่พันรอบลูกกลิ้งหมุนบนช่องว่าง จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ การบดจะทำให้เกิดการผสมทันที เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างพอลิเมอร์บนลูกกลิ้ง และส่วนที่อยู่บนช่องว่างเกิดเร็วขึ้น ทำไปเรื่อย ๆ เมื่อการผสมเสร็จสิ้นลง ใช้มีดกรีดตามความกว้างของลูกกลิ้งและดึงออกมาเป็นแผ่น

เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ในตอนต้นถูกนำมาใช้ในการผสมยางโดยมีขนาดของการบดผสมต่าง ๆ กัน เครื่องขนาดใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 84 นิ้ว ขนาดมาตรฐานมีขนาด 60 48 และ 36 นิ้ว ส่วนขนาดเล็กใช้ในห้องทดลอง มีขนาด 18 12 และ 6 นิ้ว

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

V.P.Chacko และ F.E.Karasz [9] ทำการศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ค่าความเค้นคราก (Yield stress) และการยืด ๓ จุดขาดลดลง แต่หลังจากเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ด้วย Isopropyl triisostearyl titanate พบว่าปรับปรุงสมบัติทางด้านการยืด ๓ จุดขาด และค่าความเค้นครากเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีน [9]

Sample	Stress %		Elongation %	
	U	T	U	T
LPE	13.3		9	
+2%CaCO ₃	22.6	23.5	9	23
+4%CaCO ₃	22.0	22.2	7	15
+8%CaCO ₃	14.7	19.8	4	15
+19%CaCO ₃	12.68		3	3
MPE	12.9		530	
+2%CaCO ₃	8.6	12.3	140	290
+4%CaCO ₃	7.5	16.8	22	394
+8%CaCO ₃	7.0	13.3	100	300
+19%CaCO ₃	18.2	13.0		42
HPE	28.1		820	
+2%CaCO ₃	21.2		595	
+19%CaCO ₃	13.7	12.1	20	20
PE/38%CaCO ₃	12.6		410	

*U = untreated CaCO₃, T = CaCO₃ + 0.5%KRTTS

M.M.Tariq, J.C.Pierre, F.Meroslav และ D.Alain [10] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยนำมาผสมด้วย Carbon black พบว่าให้ค่าความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) ที่ดี หลังจากเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของ Carbon black ด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agents) ทำให้ลดแรงกระทำระหว่างอนุภาคของพอลิเมอร์กับสารตัวเติม อีกทั้งยังปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติม ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ถึง 2.5 [10]

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black [10]

Weight Present Of Carbon black	Carbon black		
	Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Break Elongation (%)
0	787	20.3	823
5	958	21.5	469
10	1018	21.8	352
15	1044	22.6	543
20	1324	24.6	375
25	1447	25.7	321
30	1501	27.3	221
35	1596	28.01	309
40	2030	30.4	154

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังจากปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ -Methacryloxy-propyltrimethoxy silane [10]

Weight Present Of Carbon black	Carbon black		
	Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Break Elongation (%)
0	787	20.3	823
5	954	21.2	396
10	990	21.6	311
15	1032	22.7	59
20	1226	24.7	114
25	1496	26.3	112
30	1414	27.7	34
35	1465	29.2	89
40	1760	30.8	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผสมด้วย Carbon black หลังปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ - Aminopropyl – triethoxy silane [10]

Weight Percent Of Carbon black	Carbon black		
	Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Break Elongation (%)
0	787	20.7	823
5	1039	21.7	578
10	1057	23.0	265
15	1199	24.2	303
20	1321	25.5	388
25	1386	26.9	302
30	1412	28.3	236
35	1427	30.6	153
40	1592	31.8	

S.N. Maiti และ R. Jeyakumar [11] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยนำมาผสมด้วย CaCO_3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะให้ค่า ความเค้นคราก ความเครียดคราก ความเครียด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง ขณะที่ค่าความแข็งแรง ณ จุดขาด และ โมดูลัสเพิ่มขึ้น แต่หลังจากเมื่อนำสารตัวเติมมาปรับปรุงพื้นผิวด้วย Neopentyl (diallyl) neodecanoyl titanate พบว่าช่วยลดแรงยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม ดังแสดงในตารางที่ 2.6 [11]

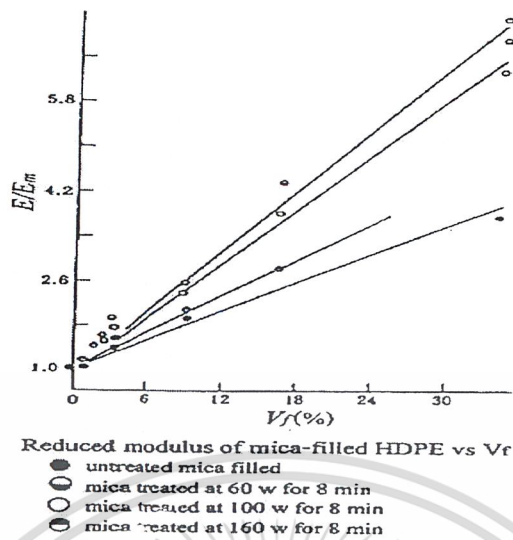
ตารางที่ 2.6 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของ HDPE / CaCO₃ คอมพอสิต [11]

Sample Composition	Yield Stress		Yield Elongation		Breaking Strength		Breaking Elongation		Elastic Modulus	
	$\sigma_y \times 10^{-3}$ (Psi)		σ_y (%)		$\sigma_b \times 10^{-3}$ (Psi)		e_b (%)		$E \times 10^{-4}$ (Psi)	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
HDPE (unfilled)	2.9	-	9.0	-	1.4	-	426	-	8.6	-
HDPE+CaCO ₃ 5 %	2.9	2.6	9.0	8.0	1.5	1.3	225	240	8.7	8.3
HDPE+CaCO ₃ 10 %	2.8	2.5	9.0	7.0	1.3	1.2	93	153	9.4	8.2
HDPE+CaCO ₃ 20 %	2.6	2.3	7.8	8.0	1.0	0.9	35	44	10.2	8.3
HDPE+CaCO ₃ 35 %	2.4	2.2	5.0	5.2	2.6	1.9	7.0	8.4	11.0	9.4
HDPE+CaCO ₃ 50 %	2.2	1.9	2.0	4.4	2.2	1.7	2.4	4.0	11.2	9.5
HDPE+CaCO ₃ 60 %	1.9	1.7	0.9	2.0	1.9	1.7	0.9	2.0	11.5	9.7

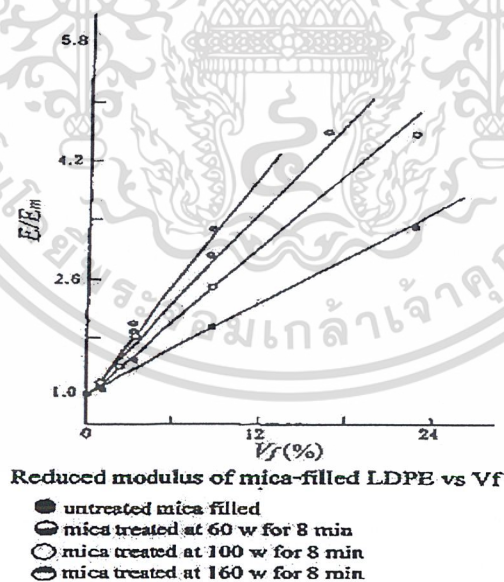
Q.Fu และ G.Wang [12] นำ HDPE มาผสมด้วย CaCO₃ ซึ่งถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยฟอสเฟต พบว่าที่อัตราส่วนของ HDPE ต่อ CaCO₃ (80/20) จะให้ค่าความเหนียว และความทนทานต่อแรงกระแทกมากกว่า HDPE ที่ไม่ได้ผสมด้วย CaCO₃

C.D.Han , C.Sandford และ H.J.Yoo [13] ทำการศึกษาสมบัติของพอลิโพรพิลีน (HDPE , PP) ที่ผสมด้วย CaCO₃ Talc และ fiber glass ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไททานเตจจะทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงดึงลดลง ขณะที่ค่าการยึด ฉ จุดขาด และค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

X. Xi และ G. Xiaoyi [14] ทำการศึกษาระยะการกระจายตัวของ ไมก้า ในพอลิเอทิลีน พบว่า สารตัวเติมที่มีการกระจายตัวที่ดีกว่าจะให้ค่ามอดูลัสที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ถึง 2.13 [14] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดุลัส ของ HDPE ที่ผสมด้วย ไมง้า (E_m) และ LDPE (E) กับ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (V_f) [14]



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ยังมอดุลัส ของ LDPE ที่ผสมด้วย ไมง้า (E_m) และ LDPE

กับ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตร V_f [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B.Pukanszky และ F.Tudos [15] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย กรดสเตียริก พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกรดสเตียริก จะทำให้ได้ค่าความเค้นครากลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.7 [15]

ตารางที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 [15]

Surface coverage (%)	Treatment type	Yield stress (MPa)
0	Stearic acid	58.6
10	Stearic acid	50.9
25	Stearic acid	47.0
50	Stearic acid	45.2
75	Stearic acid	42.9
100	Stearic acid	42.1

D.E.Bissaad และ J.Beniska [16] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย มาลิกแอนไฮไดรด์ พบว่าปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ 2 เปอร์เซ็นต์ และ ปริมาณ CaCO_3 20 เปอร์เซ็นต์ ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และให้ความสามารถในการแปรรูปที่ดี

A.D.Kupfer [17] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย CaCO_3 พบว่าค่ามอดูลัสและค่าความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความแข็งแรงลดลง

A.M.Riley , C.D.Paynter , P.M.McGcenity และ J.M.Adam [18] นำพอลิพรอพิลีนมาผสมด้วย mineral (Talc , mica , clay , CaCO_3) ทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.8 [18]

ตารางที่ 2.8 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิพรอพิลีน [18]

Sample	Charpy impact strength (kg/m ²)	FW impact energy (J)
1CBR	11.50±1.64	1.22±0.01
1CBR	12.48±0.47	1.10±0.14
2CBR	11.99±2.88	1.66±0.56
2CBR	18.82±3.63	8.59±1.99
3CBR	16.75±4.85	5.21±2.36
3CBR	19.92±4.63	4.62±2.86

*1 = Unfilled PP (homopolymer) , 2 = 30% Polcarbonate in PP , 3 = 30% Stearate coated Polcarbonate in PP , CBR = compounded on brabender , CBR = compound on Baker-Perkins

L.S.Chen , Y.W.Mai และ B.Cotterell [19] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วย mineral เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ค่าความแข็งดิ่งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ปริมาณ CaCO₃ 10 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ช่วยลดต้นทุนการผลิต และไม่ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ค่า Young 's Modulus (E) และ Fracture Energy (G_c) ของพอลิพรอพิลีนที่ผสม และไม่ได้ผสมด้วยสารตัวเติมที่อุณหภูมิห้อง [19]

Material	E (GPa)	G _c (kJ/m ²)
PP homopolymer	1.40	2.87
PP homopolymer + omyacarb	1.78	3.13
PP homopolymer + winnofils	1.66	2.56
PP copolymer	1.12	3.86
PP copolymer + omyacarb	1.30	4.08
PP copolymer + winnofils	1.23	3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H.P.Schreiber , J.M.Viau , A.Fetoui และ Z.Deng [20] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยนำมาผสมด้วย CaCO_3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น และค่าการยืด ณ จุดขาดลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.10 [20]

ตารางที่ 2.10 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่ผสมและไม่ได้ผสมด้วย CaCO_3 [20]

Compound	Modulus (E) MPa	Elongation		
		E/E_0	E_r (%)	$E_r/(E_r)^0$
LLDPE-control	270(\pm 12)	1.00	360(\pm 15)	1.00
+5% CaCO_3	305	1.13	263	0.73
+8% CaCO_3	335	1.24	216	0.60
+12% CaCO_3	360	1.33	158	0.44
+20% CaCO_3	370	1.37	75	0.21
+30% CaCO_3	385	1.42	29	0.08

จากงานวิจัยที่ 8 ถึง 20 สามารถสรุปสมบัติของพอลิเมอร์เมื่อผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

สัญลักษณ์ :

A – G คือ คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ศึกษาเมื่อมีสารเติมแต่งผสมอยู่ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวมีความหมายดังต่อไปนี้

Modulus	=	A	↑	=	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อ
Tensile Strength	=	B			ปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น
Break Elongation	=	C	↓	=	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ลดลงเมื่อ
Impact Strength	=	D			ปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น
Yield Stress	=	E	-	=	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ทดสอบ
Hardness	=	F			และ สารตัวเติมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว
Stiffness	=	G			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 สรุปสมบัติเชิงกลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [21]

หมายเลขเอกสารอ้างอิง	พอลิเมอร์	สารตัวเติม (เพิ่ม)	สารปรับปรุงพื้นผิว / วิธีการที่ใช้	A	B	C	D	E	F	G
9	PE	CaCO ₃	Isopropyl triisostearyl titanate	-	-	↓	-	↓	--	↓
10	HDPE	CaCO ₃	Silane coupling agents	-	-	-	-	-	↓	↓
11	HDPE	CaCO ₃	Neopentyl(diallyl) neodecanoyl titanate	↓	-	↓	-	-	-	-
12	HDPE	CaCO ₃	Phosphate	-	-	-	↓	-	-	↓
13	HDPE/PP	CaCO ₃	Coupling agents	↓	↓	↓	↓	-	-	-
14	HDPE/PP	Mica	Plasma	↓	-	-	-	-	-	-
15	PP	CaCO ₃	Stearic acid	-	-	-	-	↓	-	-
16	PP	CaCO ₃	Maleic anhydride	↓	↓	-	↓	-	-	-
17	PP	CaCO ₃	-	↓	↓	-	↓	-	-	-
18	PP	Talc	-	↓	-	-	↓	-	-	-
19	PP	Mineral	-	-	-	-	-	-	-	↓
20	LLDPE	CaCO ₃	-	↓	-	-	-	-	-	-

Carl R.C.,JR. [22] ทำการศึกษาเครื่องมือและวิธีในการใช้การกรองตะกอนโดยใช้แรงโน้มถ่วงและสูญญากาศพบว่าการกรองตะกอนโดยใช้วิธีนี้ทำได้รวดเร็ว มีประสิทธิภาพในการกรองสูง และมีการดึงน้ำออกจากตะกอนและการระบายน้ำใช้ระบบสูญญากาศดึงน้ำตะกอนออกกำจัดปัญหาการอุดตันของเครื่องกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Peter J.,D. [23] ทำการศึกษาวิธีการกรองโดยใช้ความดันลด เพื่อให้เกิด backwash พบว่ามีขั้นตอนดังนี้กำจัดสารปนเปื้อนส่วนแรกออกจากของไหล จากนั้นกำจัดสารปนเปื้อนส่วนที่สองออกจากของไหลและวัดปริมาณของของไหลที่ผ่านไปที่ผิวจนกระทั่งความดันลดเพิ่มขึ้นตลอดพื้นที่ผิวการกรองซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของไหลที่ผ่านพื้นที่การกรองที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันลดเพิ่มขึ้น

Iosif S.,B. และ Mario B. [24] ทำการศึกษาเครื่องมือและวิธีการกรองซึ่งใช้ semi-permeable membranes เช่นการกรองในกระบวนการ Ultrafiltration พบว่าปัญหาที่สำคัญคือ พื้นที่ผิวของ membranes บางบริเวณไม่สามารถกรองสิ่งสกปรกได้ส่วนวิธีแก้ปัญหานี้คือ การทำให้มีสารละลายอยู่ใน การกรองตลอดเวลา



บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ใช้แล้ว
- 3.1.2 CaCO_3 ขนาดอนุภาค 0.5 ไมครอน เกรดเคลือบด้วยกรดสเตียริก บริษัท สุรินทร์ออมยา เคมีคอล จำกัด
- 3.1.3 สารให้ฟอง Azodicarbonamide (commercial grade D800) บริษัท แดงจิน เคมีคอล จำกัด
- 3.1.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodiumhydroxide) 37% W/V (commercial grade) บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.5 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) 37% W/V บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.6 กรดกลacialอะซิติก (Glacial Acetic acid) บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.7 โทลูอีน (Toluene) บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.8 อะซิโตน (Acetone) บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.9 เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.10 น้ำกลั่น
- 3.1.11 น้ำมันซิลิโคน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) บริษัท LAB TECH CO.,LTD
- 3.2.2 เครื่องขึ้นรูปชิ้นงานแบบอัด (Compression molding) บริษัท LAB TECH CO.,LTD
- 3.2.3 เครื่องบด (Grinding machine) รุ่น NEMA 600 บริษัท LAB TECH CO.,LTD
- 3.2.4 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness) บริษัท YASUDA CO.,LTD
- 3.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural testing machine) บริษัท LLOYD INSTRUMENTS
- 3.2.6 เครื่องทดสอบความทนทานต่อการขัดถู (Abraser) รุ่น LR30K บริษัท MESSMER INSTRUMENT,LTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.7 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
- 3.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) บริษัท NS Electronic CO.,LTD

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมส่วนผสม

1. นำขวดน้ำดื่มพลาสติกแบบขุ่น (HDPE) มาล้างทำความสะอาด ตากให้แห้ง นำเข้าเครื่องไมตัดพลาสติก เพื่อทำการย่อยพลาสติกให้มีขนาดเล็กกลง
2. ชั่งส่วนผสมต่าง ๆ ให้ได้ตามตารางที่ 3.1

3.3.2 การผสม

1. เปิดสวิตซ์ตั้งความร้อนเครื่องบดผสมชนิดสองลูกกลิ้ง โดยตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งหน้า 180 องศาเซลเซียส และลูกกลิ้งหลัง 170 องศาเซลเซียส
2. ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้เหมาะสมแล้วผสมขวดพลาสติกชนิดขุ่น (HDPE) กับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1 ให้เข้ากัน
3. เติมสารไอโซฟอง (Azodicarbonamide) แล้วผสมให้เข้ากัน 5 นาที
4. รีดของผสมให้เป็นแผ่นแล้วนำออกจากเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ทิ้งให้เย็น

3.3.3 การขึ้นรูป

1. นำแผ่นของผสมที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปขึ้นงานแบบอัดที่อุณหภูมิ 230°C เป็นเวลา 5 นาที
2. นำชิ้นงานที่ได้หล่อเย็น 5 นาที
3. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมต่างๆของสารเคมีที่ใช้

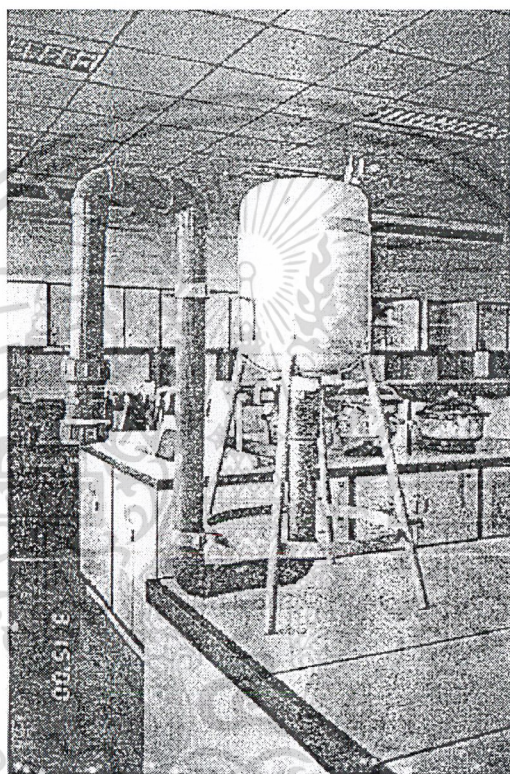
สารเคมี	AZ 3 %	AZ 5 %	AZ 7 %
HDPE : CaCO_3	60 : 40	60 : 40	60 : 40
HDPE : CaCO_3	70 : 30	70 : 30	70 : 30
HDPE : CaCO_3	80 : 20	80 : 20	80 : 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.3.4.1 ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

นำชิ้นงานตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร แล้วทดสอบด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำแบบง่ายดังรูปที่ 3.1 โดยใช้ความดันก๊าซในการวัด 1 บาร์เกจ เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำ

3.3.4.2 ทดสอบความหนาแน่น

- นำชิ้นงานขนาด 12 x 12 x 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปชิ้นงานแบบอัดมาวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงที่แน่นอน
- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงาน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) และคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.4.3.1 ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ตามมาตรฐาน ASTM D790

- ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 25x80 x 3.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ทดสอบโดยใช้เครื่อง Flexural Testing Machine
- กำหนดสภาวะของเครื่องดังนี้

Test speed : 1.3 มิลลิเมตร / นาที

Support span : 50 มิลลิเมตร

Load cell : 1 กิโลนิวตัน

Cell class : 0.5

จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ 5 ชิ้น

3.3.4.3.2 ความทนทานต่อการขัดถู (Resistance to Abrasion) ตามมาตรฐาน ASTM D1044-90

- ตัดชิ้นงานให้เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงาน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
- ทดสอบโดยใช้เครื่อง Abraser
- กำหนดสภาวะของเครื่องดังนี้

Load : 1 กิโลกรัม

รอบการทดสอบ : 1000 รอบ

- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงาน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) หลังการทดสอบ
- คำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักชิ้นงานที่สูญเสียไป

3.3.4.3.3 ความแข็ง (Hardness) แบบ Shore D ตามมาตรฐาน ASTM D2240

- นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปมาทดสอบ โดยเครื่อง Durometer
- ทำการทดสอบ 10 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

3.3.4.4 ทดสอบการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D543-87

- ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2 x 2 x 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร
 - ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงาน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
 - แช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน
 - ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงาน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
- หลังการทดสอบ
- คำนวณ % น้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมต่อน้ำหนักชิ้นงาน

3.3.4.5 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

นำพลาสติกที่ต้องการทดสอบมาแช่ในไนโตรเจนเหลวจนแข็งตัวทำให้ได้ขนาดประมาณ 2 x 5 ตารางเซนติเมตร นำตัวอย่างที่ได้มาเข้าเครื่องเคลือบทอง จากนั้นทำการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

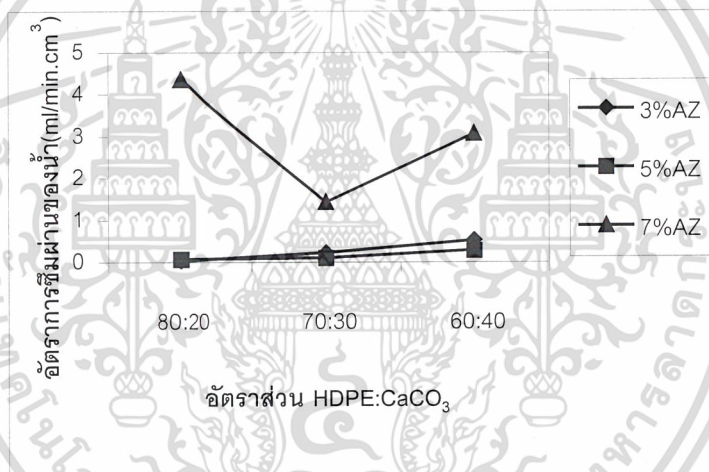


บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability)

จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำโดยใช้เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันก๊าซ 1 บาร์เกจ พื้นที่หน้าตัดในการวัด 9.62 ตารางเซนติเมตร พบว่า ที่ปริมาณ AZ เท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์ อัตราการซึมผ่านของน้ำจะมากกว่าที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากรูพรุนภายในชิ้นงานเกิดจากการสลายตัวของเอโซโดคาร์โบนาไมด์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเอโซโดคาร์โบนาไมด์ ทำให้มีปริมาณรูพรุนมากขึ้นอัตราการซึมผ่านของน้ำจึงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1

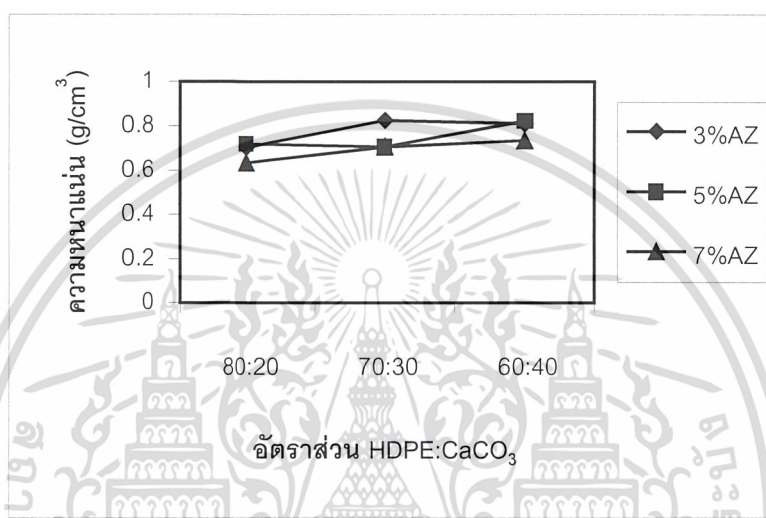


รูปที่ 4.1 อัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผู้วิจัยทำขึ้นกับชิ้นงานในระดับการค้าพบว่า ชิ้นงานในระดับการค้ามีอัตราการซึมผ่านน้ำ 160.43 ml/min.cm² ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานจากการทดลองซึ่งมีอัตราการซึมผ่านของน้ำไม่เกิน 5 ml/min.cm² มาก ที่กล่าวมาข้างต้นแสดงผลตรงกับผลจากสัญฐานวิทยา ซึ่งจะได้พิจารณาต่อไป

4.2 การศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงาน (Density)

จากผลการทดลองหาความหนาแน่นของชิ้นงานดังรูป 4.2 พบว่า เมื่อปริมาณ AZ เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเนื่องจาก AZ ปริมาณมากมีโอกาสทำให้เกิดฟองก๊าซจำนวนมากขึ้น ความหนาแน่นจึงมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานในระดับการค้ำซึ่งมีความหนาแน่น 0.701 g/cm^3 กับชิ้นงานที่ผลิตได้มีความหนาแน่น 0.63 ถึง 0.83 g/cm^3 พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

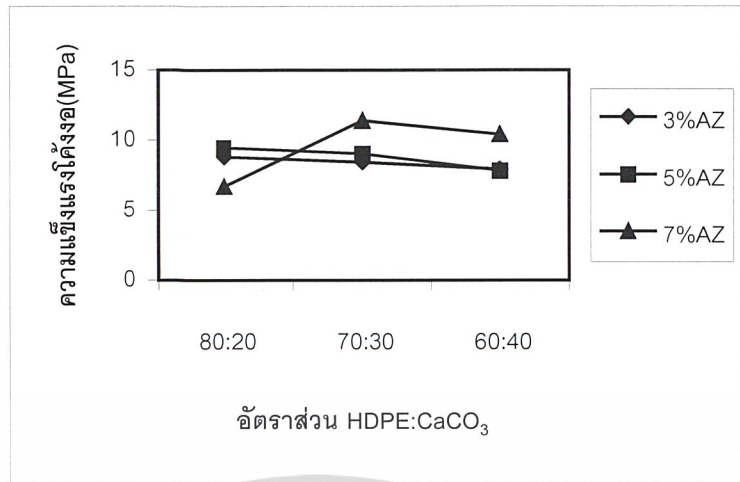


รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%

4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

4.3.1 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)

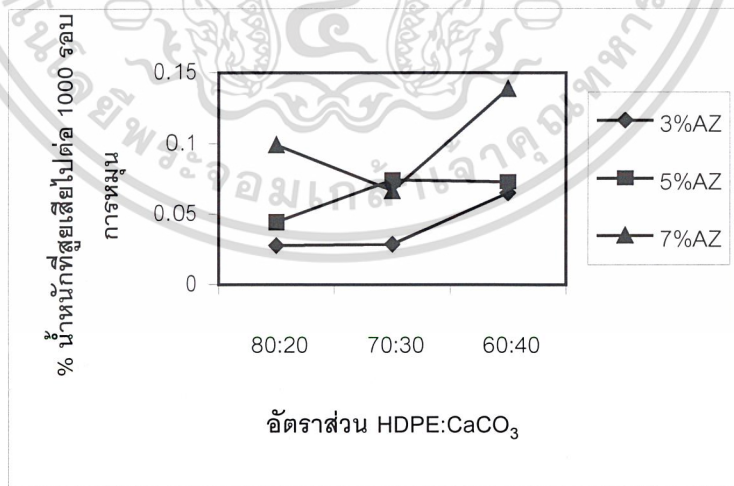
จากผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.3 ที่ปริมาณ AZ น้อยๆ (3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO₃ เนื่องจาก CaCO₃ แยกวัฏภาคจาก HDPE ทำให้ความแข็งแรงโค้งงอลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผลิตได้ซึ่งมีค่าความแข็งแรงโค้งงอ 6.7 ถึง 10.4 MPa กับชิ้นงานระดับการค้ำซึ่งมีค่าความแข็งแรงโค้งงอ 4.39 MPa ชิ้นงานที่ผู้วิจัยผลิตได้มีความแข็งแรงโค้งงอมากกว่าชิ้นงานทางการค้ำ



รูปที่ 4.3 ความแข็งแรง โค้งงอของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%

4.3.2 ความทนทานต่อการขัดถู (Resistance to abrasion)

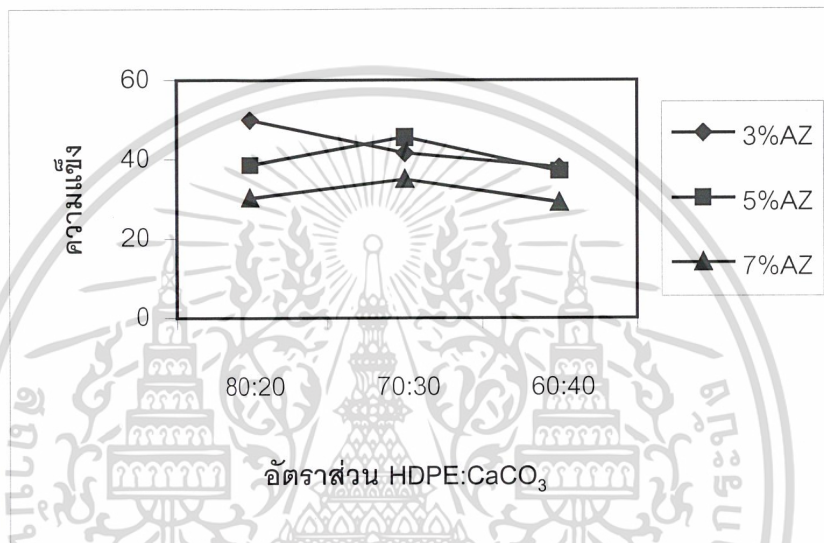
จากผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.4 พบว่าปริมาณของ AZ และ CaCO₃ ให้ผลเหมือนกันคือเมื่อปริมาณของสารแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การหายไปเนื่องจากการขัดถูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกรณีของ CaCO₃ ซึ่งแยกตัวจากกับ HDPE ทำให้ถูกขัดถูออกได้ง่าย ส่วนในกรณีของ AZ ทำให้ชิ้นงานมีการยึดติดกันน้อยลงเมื่อถูกขัดถูจึงสึกกร่อนได้ง่ายเช่นกัน



รูปที่ 4.4 ความทนทานต่อการขัดถูของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%

4.3.3 ความแข็ง (Hardness)

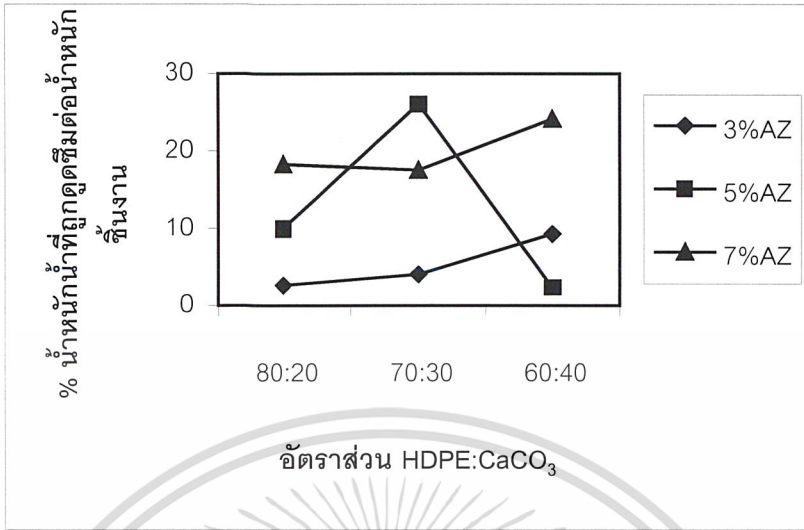
จากผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.5 พบว่า ที่อัตราส่วน HDPE:CaCO₃ เดียวกัน เมื่อปริมาณ AZ เพิ่มขึ้น ความแข็งลดลงเนื่องจาก AZ ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นโฟม ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานจึงมีความแข็งลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานในระดับการค้ำซึ่งมีค่าความแข็ง 33.35 กับชิ้นงานที่ผลิตได้ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 30 ถึง 50 พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.5 ความแข็งของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%

4.4 การศึกษาการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

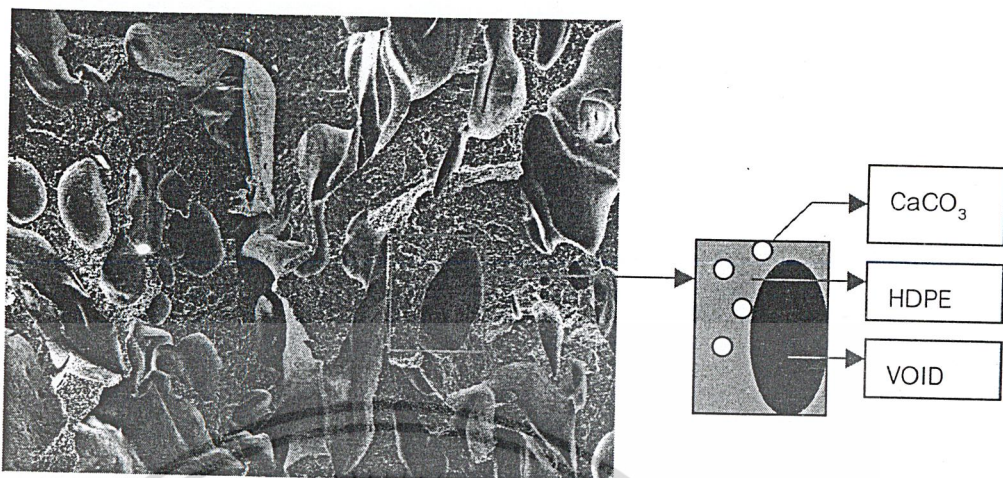
จากผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ AZ จะทำให้พื้นที่ผิวทั้งภายในและภายนอกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมต่อน้ำหนักชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณ AZ 3% 5% และ 7%

4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน (Morphology)

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ เป็น 80:20 , 70:30 และ 60:40 โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารให้ฟอง (AZ) เป็น 3 , 5 , 7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (รูปที่ 4.7 ถึง 4.15) พบว่าผลที่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารให้ฟอง กล่าวคือยิ่งปริมาณสารให้ฟองเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.15) ความเป็นรูพรุนของชิ้นงานจะมีมากขึ้นและสม่ำเสมอว่าชิ้นงานที่มีปริมาณสารให้ฟองน้อย (รูปที่ 4.7) เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ได้จากการค้า (รูปที่ 4.16) พบว่าระยะห่างระหว่างรูพรุนมีความสม่ำเสมอและกระจายตัวทั่วชิ้นงานส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำดีกว่าชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง แต่ทั้งนี้ชิ้นงานที่ได้จากการค้าไม่ได้รับการเปิดเผยสูตรผสม จึงใช้เป็นแนวทางเปรียบเทียบกับสูตรผสมในทางการวิจัยไม่ได้ เพียงเพื่อเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงสูตรผสมในการวิจัยต่อไปเท่านั้น



— 100 μ m

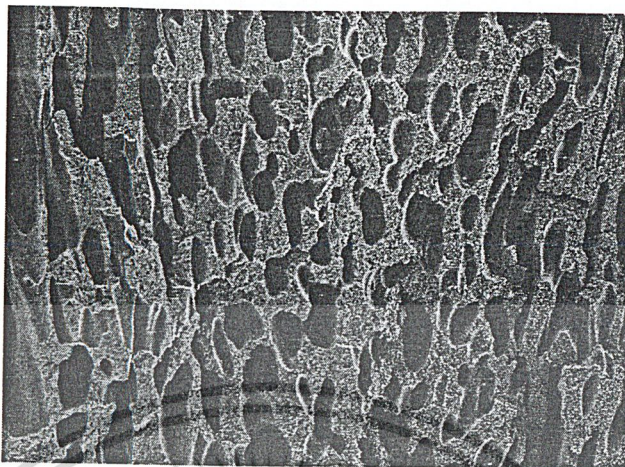
รูปที่ 4.7 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 AZ 3% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



— 100 μ m

รูปที่ 4.8 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 70:30 AZ 3% ที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



— 100 μ m

รูปที่ 4.9 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 60:40 AZ 3% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



— 100 μ m

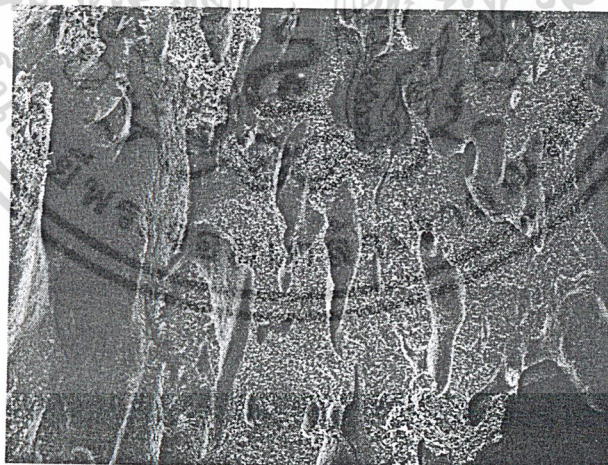
รูปที่ 4.10 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 AZ 5% ที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



— 100 μ m

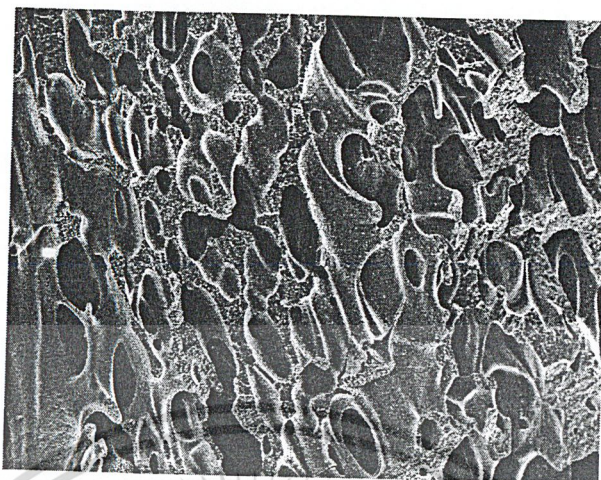
รูปที่ 4.11 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 70:30 AZ 5% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



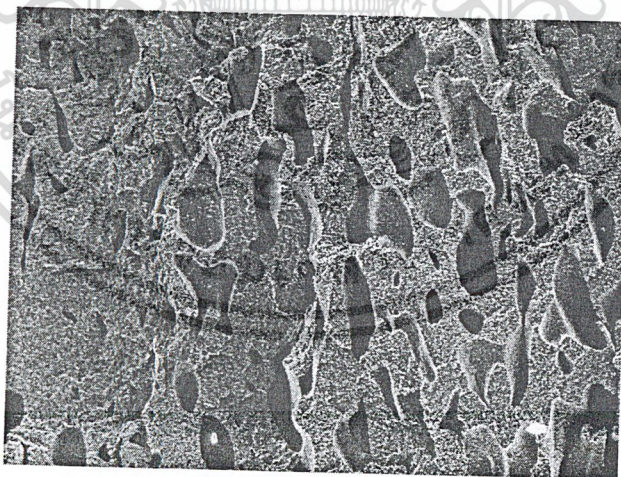
— 100 μ m

รูปที่ 4.12 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 60:40 AZ 5% ที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

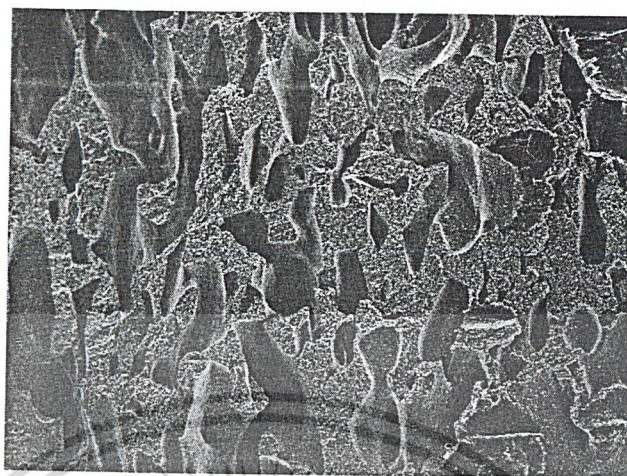


รูปที่ 4.13 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 80:20 AZ 7% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



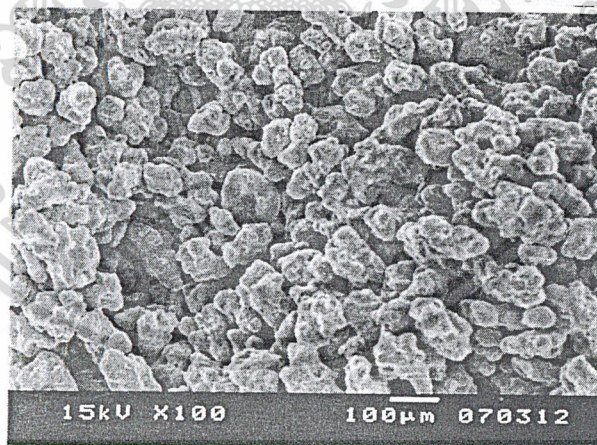
รูปที่ 4.14 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 70:30 AZ 7% ที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



— 100μm

รูปที่ 4.15 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 60:40 AZ 7% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.16 SEM Micrograph ของชิ้นงานที่ทำในระดับการค้าที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ชีงงานที่มีปริมาณ AZ 7% อัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ 60:40 ใช้ในงานกรองได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีอัตราการซึมผ่านของน้ำสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรผสมอื่น และมีสมบัติเชิงกลเพียงพอ
2. การซึมผ่านของน้ำผ่านชีงงานจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อชีงงานนั้นมีรูพรุนที่มีลักษณะเป็นเซลล์เปิด รูพรุนที่กล่าวถึงนี้เกิดจากการสลายตัวของ AZ กลายเป็นฟองก๊าซแทรกตัวอยู่ในชีงงาน
3. ขนาดและปริมาณของรูพรุนที่แตกต่างกันเกิดจากการรวมตัวเป็นกลุ่มที่แตกต่างกันของฟองก๊าซซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณ AZ ที่ใช้ และการกระจายตัวของ AZ ในชีงงานระหว่างการผสม อธิบายได้ว่าถ้าใช้ปริมาณ AZ มากโอกาสที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และสลายตัวให้ฟองก๊าซขนาดใหญ่และเกิดปริมาณรูพรุนมาก การกระจายตัวของ AZ ที่ดีจะทำให้ชีงงานมีลักษณะเหมือนกันทั้งชีง ค้วยเหตุนี้ถ้าขนาดรูพรุนใหญ่ ปริมาณมาก และการกระจายตัวของรูพรุนทั่วชีงงานก็จะทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมากและเป็นการซึมผ่านที่ดีเกิดทั่วทั้งชีงงาน
4. ขนาดของรูพรุนเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะจะบ่งบอกขนาดของตะกอนที่จะกักไว้ จึงต้องเลือกใช้ปริมาณ AZ ให้เหมาะสมกันเป็นกรณีๆ ไป ชีงงานที่ผู้วิจัยทำขึ้นมีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 5 ถึง 400 ไมครอน
5. CaCO₃ จะแยกวัฏภาคกับ HDPE จึงมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของชีงงาน คือจะทำให้ความแข็งแรงโค้งงอลดลง ความทนทานต่อการขัดถูลดลง และความแข็งลดลง
6. การเพิ่มปริมาณ AZ จะส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำ ค่าความแข็งแรงโค้งงอ และการดูดซึมน้ำมากขึ้น แต่จะมีผลทำให้ความหนาแน่น ความทนทานต่อการขัดถู ความแข็งแรง และความทนทานต่อสารเคมีลดลง
7. เมื่อเปรียบเทียบชีงงานที่ผู้วิจัยทำขึ้นกับชีงที่ทำเพื่อการค้าพบว่า ในแง่ของสมบัติเชิงกล ชีงงานที่ได้มีคุณสมบัติเพียงพอ แต่ในด้านของการซึมผ่านของน้ำยังต้องพัฒนาให้ดีขึ้นต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมความดันได้เพื่อใช้ในการกรองจริง และวัดขนาดอนุภาคที่กรองได้
2. ศึกษาอายุการใช้งาน (Aging) ของแผ่นกรองที่ผลิตได้ และวิธีที่จะทำให้แผ่นกรองมีประสิทธิภาพอีกครั้ง เมื่อหมดอายุการใช้งาน
3. ศึกษาผลของสารตัวเติมอื่นที่อาจนำมาใช้แทน CaCO_3
4. ศึกษาสารช่วยกระจายตัวที่สามารถใช้กับ AZ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมาทดลองใช้และศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผลิตได้
5. ศึกษาผลของความหนาของแผ่นกรองน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านของน้ำ
6. ผลิตแผ่นกรองน้ำโดยอาศัยเทคนิคอื่น เช่น กระบวนการอัดแบบชนิดฉีดและกระบวนการอัดรีด
7. ถ้าต้องการใช้งานเฉพาะทาง เช่น งานกรองที่ความดันสูง หรืองานที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมี ควรจะมีการพัฒนาชิ้นงานให้มีความเหมาะสมกับงานนั้นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำของชิ้นงาน ($\text{g}/\text{min}.\text{cm}^2$) เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ และปริมาณ Azodicarbonamide

สูตรการผสม HDPE:CaCO ₃	ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์					
	3%	SD	5%	SD	7%	SD
80:20	0.0311	0.2903	0.0812	2.5426	4.3592	6.9579
70:30	0.2188	0.5303	0.1129	0.2051	1.4300	4.9255
60:40	0.5269	2.6057	0.2871	0.1838	3.0743	5.7900

ตารางที่ ก-2 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3) เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ และปริมาณ Azodicarbonamide

สูตรการผสม HDPE : CaCO ₃	ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์		
	3%	5%	7%
80:20	0.7032	0.7182	0.6344
70:30	0.8258	0.7050	0.7072
60:40	0.8092	0.8216	0.7348

ตารางที่ ก-3 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน (MPa) เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ และปริมาณ Azodicarbonamide

สูตรการผสม HDPE:CaCO ₃	ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์					
	3%	SD	5%	SD	7%	SD
80:20	8.804	1.146	9.446	0.786	6.708	0.200
70:30	8.429	0.452	9.057	1.428	11.360	1.028
60:40	7.932	0.084	7.836	0.573	10.403	0.221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 เปรอ์เซนต์น้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานต่อ1000 รอบการหมุน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตรา ส่วนของ HDPE:CaCO₃ และปริมาณ Azodicarbonamide

สูตรการผสม HDPE:CaCO ₃	ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์					
	3%	SD	5%	SD	7%	SD
80:20	0.0273	0.0108	0.0446	0.0057	0.0992	0.0270
70:30	0.0285	0.0119	0.0744	0.0320	0.0666	0.0078
60:40	0.0651	0.0132	0.0728	0.0160	0.1387	0.0106

ตารางที่ ก-5 ค่าความแข็งของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE:CaCO₃ และปริมาณ Azodicarbonamide

สูตรการผสม HDPE:CaCO ₃	ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์					
	3%	SD	5%	SD	7%	SD
80:20	49.90	3.62	38.55	3.27	30.20	5.51
70:30	41.60	4.04	45.65	3.00	35.00	8.28
60:40	37.95	5.31	37.00	4.88	29.20	4.74

ตาราง ก-6 เปรอ์เซนต์น้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซึมน้ำหนักชิ้นงาน

สูตรการผสม HDPE:CaCO ₃	ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์		
	3 %	5 %	7 %
80 : 20	2.58	10.00	18.27
70 : 30	4.07	26.05	17.54
60 : 40	9.24	2.30	24.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. กองควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, “แผนการศึกษาแนวทางการลดมลพิษโดยการพัฒนาของเสียหรือวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ โดยการป้องกัน และแก้ปัญหามลพิษจากสารพิษและกากของเสีย”, 2541.
2. ณรงค์ วุฑฒเสถียร, “การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาลัษณ์มหิดล, 2535.
3. ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย, “เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1”, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542.
4. R.Wolfe, Plastic Handbook. 2 (1990) : 31-32.
5. E.Jesse, Plastic Additive and Modifiers Handbook. 1 (1996) : 503-512.
6. เบญจวรรณ ชนະจรัญวิทย์และคณะ, “การศึกษาท่อน้ำซึมจากฝายยางรถยนต์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ”, โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542.
7. รศ.บรรเลง ศรีนิล, “เทคโนโลยีพลาสติก”, พิมพ์ครั้งที่ 1, ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2525, PP.12-13.
8. Morton-Jones, D.H., “Polymer Processing” Chapman & Hall, London, 1989, pp. 66-67, 74-78, 146-156.
9. V.P.Chacko, and F.E.Karasz, J. Appl. Polym. Sci. 28 (1983) : 2701-2713.
10. M.M. Tariq, J.C. Pierre, F.Meroslav, and D.Alain, J.Polym. Compos. 9 (1988) : 412-418.
11. S.N.Maiti and R.Jeyakumar, J. Polymer. Mater. 7 (1999) : 29-34.
12. Q.Fu and G.Wang, J. Polym. Eng. Sci. 32 (1992) : 94-97.
13. C.D.Han, C.Sandford, and H.J.Yoo, J.Polym. Eng. Sci. 18 (1978) : 849-853.
14. X.Xi. and G.Xiaoyi, J.Polym. Sci. 9 (1991) : 108-112.
15. B.Pukanszky and F.Tudos, J. Polym. Sci. 8 (1989) : 1040-1042.
16. D.E.Bissaad and J.Beniska, J. Polym. Sci. Tech. 16 (1989) : T70-T72.
17. A.D.Kupfer, ANTEC. (1984) :191-194.
18. A.M.Riley, C.D.Paynter, P.M.M,Genity, and J.M.Adam, Plastic and rubber processing and applications. 14 (1990) : 85-93.
19. L.S.Chen, Y.W.Mai, B.Cotterell, J.Polym. Eng. Sci. 29 (1998) : 505-512.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

20. H.P.schreiber, J.M. Viau, A.Fetoui, and Z.Deng, J. Polym. Eng. Sci. 30 (1990) : 263-269.
21. พลชีพ ลิ้มพงษ์, ชำรงค์ศักดิ์ ลาภวิบูลย์สุข, “ การศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่บริสุทธิ์ และที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม ”, โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542.
22. Carl R.C, Jr. U.S.Patent. 5,858,226 (1999).
23. Peter J.,D. U.S. Patent. 5,449,465 (1995).
24. Iusif S.B., Mario B.,B. U.S. Patent. 4,790,942 (1998).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้